

GUÍA PARA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES

ELÉCTRICAS EN NEPLAN

MARY JOHANNA LOZADA RINCÓN

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA, 2019

**GUÍA PARA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES
ELÉCTRICAS EN NEPLAN**

MARY JOHANNA LOZADA RINCÓN

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniera Electricista**

Director

RICARDO ALBERTO HINCAPIÉ ISAZA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA, 2019

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres Fanny Rincón Ramírez y Eliseo Lozada Tovar, quienes pacientemente estuvieron para alentarme y aconsejarme, además a mi tía Mary Cruz Lozada quien ha sido un apoyo muy importante en mi vida.

Agradecimientos

Agradezco primero que todo a Dios por hacer esto posible y a Ricardo Alberto Hincapié Isaza por compartir sus conocimientos académicos, por el tiempo dedicado y el apoyo brindado para sacar adelante este trabajo.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	9
1.1.	Justificación	9
1.2.	Reseña histórica	10
1.3.	Estructura del documento	10
2.	Relés de Sobrecorriente	11
2.1.	Conceptos teóricos	11
2.1.1.	Relé de corriente definida	11
2.1.2.	Relé de corriente definida y tiempo definido	12
2.1.3.	Relé de tiempo inverso	12
2.1.4.	Relé de tiempo inverso con unidad instantánea	14
2.2.	Coordinación de relés de sobrecorriente	14
2.2.1.	Sistema de prueba	14
2.2.2.	Relés de corriente definida y tiempo definido	15
2.2.3.	Relés de tiempo inverso	16
2.2.4.	Relés de tiempo inverso con unidad instantánea	18
2.3.	Implementación en Neplan	19
2.3.1.	Relés de corriente definida y tiempo definido	19
2.3.2.	Relés de tiempo inverso	26
2.3.3.	Relés de tiempo inverso con unidad instantánea	29
3.	Relés de Distancia	33
3.1.	Sistema de prueba	33
3.2.	Implementación en Neplan	34
4.	Fusibles	43
4.1.	Sistema de prueba	43
4.2.	Implementación en Neplan	43
5.	Conclusiones y Recomendaciones	49
5.1.	Conclusiones	49
5.2.	Recomendaciones	49
	Bibliografía	50

Lista de figuras

Figura 2.1.	Relé de corriente definida	11
Figura 2.2.	Relé de corriente definida y tiempo definido	12
Figura 2.3.	Relés de tiempo inverso	13
Figura 2.4.	Tipos de relés de tiempo inverso	13
Figura 2.5.	Sistema de prueba	14
Figura 2.6.	Sistema de prueba implementado en Neplan	19
Figura 2.7.	Pantalla principal de Neplan	20
Figura 2.8.	Menú de elementos de protección	20
Figura 2.9.	Selección del tipo de relé de sobrecorriente	21
Figura 2.10.	Selección del modelo de curva	22
Figura 2.11.	Datos técnicos del relé	22
Figura 2.12.	Configuración del TC	23
Figura 2.13.	Características del relé	24
Figura 2.14.	Ingreso de parámetros de ajuste	24
Figura 2.15.	Características disponibles de curvas	25
Figura 2.16.	Curvas operativas de los relés del sistema	26
Figura 2.17.	Tiempos de operación ante la falla en la Línea N1-N2	27
Figura 2.18.	Curvas operativas de los relés del sistema	28
Figura 2.19.	Características del relé	29
Figura 2.20.	Ingreso de parámetros de ajuste instantáneos	30
Figura 2.21.	Ingreso de parámetros de ajuste temporizados	31
Figura 2.22.	Curvas operativas de los relés del sistema	31
Figura 2.23.	Tiempos de operación ante la falla en la Línea N3-N4	32
Figura 3.1.	Sistema de prueba	33
Figura 3.2.	Sistema de prueba implementado en Neplan	34
Figura 3.3.	Pantalla principal de Neplan	35
Figura 3.4.	Menú de elementos de protección	35
Figura 3.5.	Configuración del TC	36
Figura 3.6.	Configuración de los relés de distancia	37
Figura 3.7.	Configuración de la zona de arranque del relé de distancia	37
Figura 3.8.	Configuración de las zonas de protección	38
Figura 3.9.	Configuración del Diagrama R-X	39
Figura 3.10.	Configuración de disparo del relé de distancia	39
Figura 3.11.	Seleccionar relés y nodos asociados	40
Figura 3.12.	Diagrama de tiempo de los relés ante una falla	40
Figura 3.13.	Diagrama R-X para R1	41
Figura 3.14.	Diagrama R-X para R2	41
Figura 3.15.	Diagrama R-X para R3	42
Figura 4.1.	Sistema de prueba	43
Figura 4.2.	Sistema de prueba implementado en Neplan	44

Figura 4.3.	Pantalla principal de Neplan	44
Figura 4.4.	Menú de elementos de protección	45
Figura 4.5.	Selección del fusible	45
Figura 4.6.	Modelo de la curva	46
Figura 4.7.	Fusibles empleados	46
Figura 4.8.	Curvas características del fusible	47
Figura 4.9.	Curvas operativas de los fusibles	48

Lista de tablas

Tabla 2.1.	Ecuaciones características	13
Tabla 2.2.	Constantes de forma para ecuación exponencial (norma IEC)	14
Tabla 2.3.	Constantes de forma para ecuación exponencial (norma ANSI)	14
Tabla 2.4.	Datos del sistema de prueba	14
Tabla 2.5.	Corrientes del sistema de prueba	15
Tabla 2.6.	Corrientes de cortocircuito	15
Tabla 2.7.	Ajustes de los relés de corriente y tiempo definido	16
Tabla 2.8.	Corrientes de ajuste de los relés de tiempo inverso	17
Tabla 2.9.	Dial de los relés de tiempo inverso	17
Tabla 2.10.	Corrientes instantáneas de los relés	19
Tabla 2.11.	Dial de los relés de tiempo inverso con unidad instantánea	19
Tabla 2.12.	Tiempo de operación de los relés de tiempo inverso	29
Tabla 2.13.	Tiempo de operación	31
Tabla 3.1.	Datos del sistema de prueba	33
Tabla 3.2.	Zonas de ajuste de los relés	34
Tabla 4.1.	Datos del sistema de prueba	43
Tabla 4.2.	Fusibles empleados	47

Capítulo 1

Introducción

1.1. Justificación

Un sistema de transmisión y distribución de energía eléctrica debe cumplir con varios requisitos indispensables para prestar un servicio con niveles altos de calidad y seguridad. Esto en parte se cumple mediante la aplicación de normas y procedimientos muy precisos durante las etapas de planeamiento, diseño, construcción y operación de los sistemas de potencia. Sin embargo, ante diversas condiciones operativas, dichos sistemas quedarán expuestos a fallas cuyas causas son múltiples. Estas causas además de provocar daños severos, son muchas veces impredecibles, por lo que es necesario proporcionarle a dichos sistemas los esquemas de protección debidamente ajustados con el fin de minimizar los efectos de las fallas, los tiempos de interrupción, mejorar la continuidad del servicio a los consumidores y disminuir el número de usuarios afectados [1].

Un sistema de protección bien diseñado y adecuadamente coordinado es primordial para asegurar que el sistema eléctrico de potencia opere dentro de los requerimientos y parámetros previstos. Al brindarle seguridad a redes y costosos equipos, también se está protegiendo una inversión de capital muy grande y se protege también a las personas. Por esto los costos económicos y los beneficios de un sistema de protección deben ser tenidos en cuenta con el fin de obtener un adecuado balance entre los requerimientos del sistema y los recursos financieros disponibles.

Ante la ocurrencia de una falla o de una condición anormal, el sistema de protección debe ser capaz de detectar el problema inmediatamente y aislar la sección afectada, permitiendo así que el resto del sistema de potencia permanezca en servicio y limitar la posibilidad de daño a otros equipos. Por lo tanto, la protección debe ser lo suficientemente sensible para que opere con rapidez aún bajo fallas incipientes.

Un inadecuado ajuste y coordinación de las protecciones eléctricas puede llevar a daños en los elementos del sistema de potencia o su pérdida de estabilidad. Debido a esto, el personal encargado de las protecciones en una empresa debe contar con criterios técnicos y herramientas adicionales que permitan minimizar los riesgos en los elementos del sistema de potencia y además faciliten el ajuste y la coordinación de los elementos de protección.

Por lo anterior, en este proyecto de grado se presenta una guía de coordinación de diferentes tipos de elementos de protección usando el software Neplan [2], en la cual se observan detalladamente los pasos necesarios para emplearlos en sistemas de potencia, y que pueda ser usada por personas que trabajen en el área de los sistemas eléctricos de potencia.

1.2. Reseña histórica

La evolución de los relés de protección comenzó con los relés electromagnéticos del tipo atracción [3]. Sin embargo, el diseño de los relés de protección ha cambiado significativamente durante los últimos años con el avance en microprocesadores y tecnología de procesamiento de señales.

A medida que avanzaba la tecnología electrónica, los relés electromecánicos fueron reemplazados en la década de 1960 por diseños electrónicos o estáticos que utilizaban transistores y tipos similares de elementos electrónicos. El circuito integrado permitió que los diseños estáticos fueran más ampliados y mejorados en la década de 1970.

Luego en los años 80 empezaron a aparecer el desarrollo de los microprocesadores, microprocesadores básicos programables y relés de protección multifunción micro-controlada.

Posteriormente en la década de 1990 la tecnología de los microprocesadores, junto con las mejoras en algoritmos matemáticos, impulsó el desarrollo de los relés numéricos que son extremadamente comunes por sus capacidades multifuncionales, bajos precios y confiabilidad.

Los relés de protección numéricos operan sobre la base de entradas de muestreo y salidas de control para proteger o controlar el sistema monitoreado. Las corrientes y/o voltajes del sistema, por ejemplo, no se monitorean de forma continua sino que, como todas las demás cantidades, se muestrean uno a la vez. Después de adquirir muestras de las formas de onda de entrada, los cálculos se realizan para convertir los valores muestreados incrementales en un valor final que representa la cantidad de entrada asociada en función de un algoritmo definido. Una vez que se puede establecer el valor final de una cantidad de entrada, el relé de protección puede tomar la comparación apropiada con un ajuste, o valor de referencia, o alguna otra acción, según sea necesario.

Dependiendo del algoritmo utilizado y otros requisitos de diseño o protección del sistema, el valor final puede calcularse muchas veces dentro de un solo ciclo de muestreo, o solo una vez durante muchos ciclos. La mayoría de los relés numéricos son multifuncionales y pueden considerarse dispositivos electrónicos inteligentes (IED) [4]. Estos elementos son los más comunes hoy en día debido a su versatilidad y capacidades de comunicación y almacenamiento, y además permiten ajustar diferentes tipos de funciones de protección.

1.3. Estructura del documento

Este proyecto es organizado de la siguiente manera:

En el Capítulo 2 se presentan los aspectos teóricos más importantes sobre los relés de sobrecorriente, así como los conceptos necesarios para su implementación en Neplan. En el Capítulo 3 se detallan los aspectos necesarios para coordinar relés de distancia. En el Capítulo 4 se ilustran los pasos requeridos para proteger un sistema de distribución usando fusibles. Finalmente se encuentran las conclusiones y recomendaciones derivadas de este proyecto.

Capítulo 2

Relés de Sobrecorriente

En este capítulo se presentan los aspectos teóricos más relevantes de los diferentes tipos de relés de sobrecorriente, las características empleadas para su coordinación por medio de un ejemplo de aplicación, así como la descripción detallada de la forma de ajustarlos y coordinarlos en Neplan.

2.1. Conceptos teóricos

2.1.1. Relé de corriente definida

En este tipo de relé, se presenta una operación instantánea cuando la corriente alcanza un valor prefijado (ver Figura 2.1). El ajuste de este relé se hace de tal forma que el extremo más alejado de la fuente, opere con el valor más bajo de corriente y progresivamente los ajustes van aumentando a medida que se vayan acercando a la fuente. Según esto, el dispositivo con menor ajuste opera primero y desconecta la carga en el punto más cercano a la falla. Este tipo de protección tiene la desventaja de ser poco selectiva para altos valores de cortocircuito. Esto se debe a la dificultad para distinguir la corriente de falla entre un punto y otro, cuando la impedancia entre ellos es pequeña en comparación a la impedancia de la fuente.

Por lo anterior, los relés de corriente definida no son muy utilizados como única protección de sobrecorriente. Su uso es común como unidad instantánea cuando hay otro tipo de protección [3-5]. Este relé tiene un único parámetro de ajuste el cual se conoce como corriente de ajuste, de arranque o de pickup.

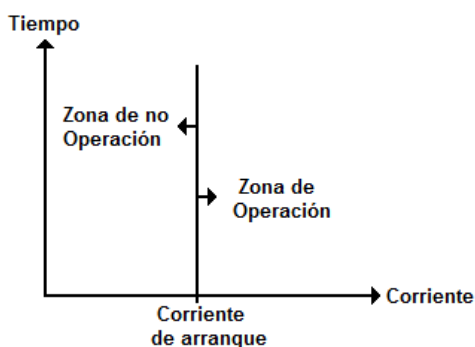


Figura 2.1. Relé de corriente definida

2.1.2. Relé de corriente definida y tiempo definido

Este tipo de relés permite ajustar la operación para diferentes niveles de corriente con diferentes tiempos de operación (ver Figura 2.2). Por lo tanto los ajustes se hacen en forma tal que el interruptor que alimenta la carga se dispare en el tiempo más corto y después sucesivamente los demás interruptores hacia la fuente, en tiempos cada vez mayores. La diferencia entre los tiempos de disparo para la misma corriente, se denominan tiempo de margen o de respaldo. Como en este relé el tiempo de operación puede ajustarse en valores definidos, no se presentan los inconvenientes del relé anterior, y por lo tanto, la protección es más selectiva.

Sin embargo, la gran desventaja con este método de discriminación, es que fallas cerca a la fuente que ocasionan las mayores corrientes, son clarificadas en un tiempo que puede ser relativamente grande. Este tipo de relés son muy utilizados cuando la impedancia de la fuente es mayor con respecto a la del elemento a proteger y por lo tanto los niveles de falla en el punto de ubicación del relé, son similares a los del extremo de la línea [3-5].

Este relé tiene dos parámetros de ajuste: *i*) la corriente de ajuste y *ii*) el tiempo de ajuste.

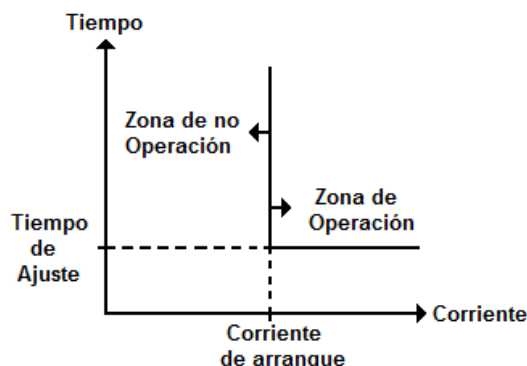


Figura 2.2. Relé de corriente definida y tiempo definido

2.1.3. Relé de tiempo inverso

La propiedad fundamental de estos relés es que operan en un tiempo inversamente proporcional a la corriente de falla de acuerdo a un grupo disponible de curvas características. Por lo tanto, la ventaja de estos relés sobre los anteriores es que ante altas corrientes pueden obtenerse tiempos de disparo muy cortos sin tener que sacrificar la selectividad (ver Figura 2.3).

Los relés de tiempo inverso se clasifican de acuerdo a la curva característica que determina la velocidad de operación. De esta manera se denominan como: inverso, muy inverso o extremadamente inverso, inverso moderado o definido (ver Figura 2.4). La diferencia entre estas curvas es que para una corriente dada ofrecen tiempos de operación diferentes a los de la curva estándar, los cuales pueden requerirse para una aplicación en particular [3-5]. Estos relés tienen dos parámetros de ajuste: *i*) la corriente de ajuste y *ii*) el dial (o curva de operación).

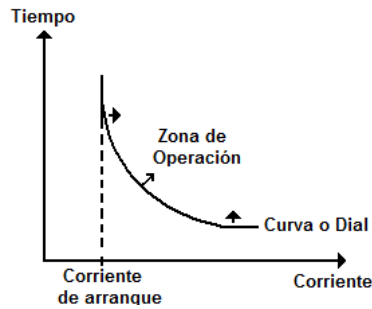


Figura 2.3. Relés de tiempo inverso

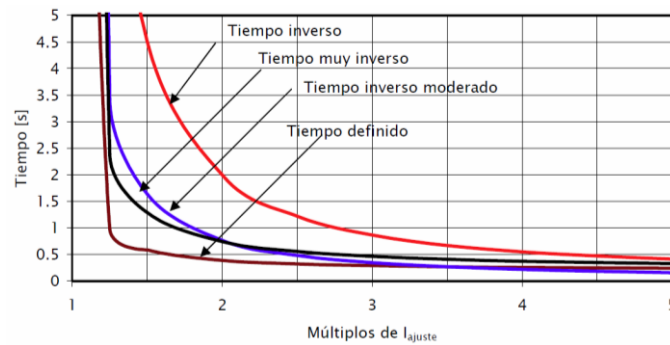


Figura 2.4. Tipos de relés de tiempo inverso [5]

Todos los tipos de curvas de operación de los relés se pueden modelar matemáticamente por medio de una ecuación característica. Existen dos formas: exponencial y polinomial, y de acuerdo normas internacionales (ANSI/IEEE, IEC) (ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Ecuaciones características [5]

Tipo de Ecuación	Ejemplos	
Exponencial	Normas IEC:	$t = a * DIAL / (M^n - 1)$
	Normas ANSI:	$t = a * DIAL / (M^n - 1) + b * DIAL$
Polinomial	$t = C_0 + C_1 / (M-1) + C_2 / (M^2-1) + C_3 / (M^3-1) + \dots$	
	$t = C_0 + C_1 / (M-1) + C_2 / (M-1)^2 + C_3 / (M-1)^3 + \dots$	

Donde,

- $a, b, n, c_1, c_2, c_3 \dots$ son las constantes de forma de la ecuación característica.
- M es la relación entre la corriente de operación del relé y su corriente de ajuste.

Las ecuaciones normalizadas tienen los siguientes valores de forma:

Tabla 2.2. Constantes de forma para ecuación exponencial (norma IEC)

Tipo de curva	a	n
Tiempo inverso estándar	0.14	0.02
Muy inversa	13.5	1
Extremadamente inversa	80	2
Tiempo inverso largo	120	1

Tabla 2.3. Constantes de forma para ecuación exponencial (norma ANSI)

Tipo de curva	a	n	b
Tiempo inverso estándar	59.5	2	1.8
Muy inversa	39.22	2	0.982
Extremadamente inversa	56.4	2	0.243
Tiempo inverso largo	0.103	0.02	0.228

2.1.4. Relé de tiempo inverso con unidad instantánea

Este tipo de relés operan como resultado de la unión de dos de los relés descritos anteriormente: tiempo inverso y corriente definida. Estos últimos relés cuando trabajan con los de tiempo inverso, son denominados como unidad instantánea. Por lo tanto, estos relés tendrán dos zonas de operación: *i*) un tiempo diferente de cero el cual es dado por el dial y *ii*) un tiempo instantáneo dado por la unidad instantánea (o relé de corriente definida). De acuerdo a esto, estos relés tienen tres parámetros de ajuste: *i*) la corriente de ajuste, *ii*) el dial (o curva de operación) y *iii*) la corriente instantánea.

2.2. Coordinación de relés de sobrecorriente

2.2.1. Sistema de prueba

Para ilustrar la coordinación de los relés de sobrecorriente se considera el sistema de la Figura 2.5. Este sistema consta de tres líneas de sub-transmisión a 33 kV y demandas en los barrajes N2, N3 y N4. Los datos del sistema se ilustran en la Tabla 2.4.

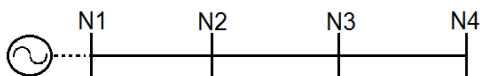


Figura 2.5. Sistema de prueba

Tabla 2.4. Datos del sistema de prueba

Elemento	Impedancia [ohm]	Longitud [km]	Potencia [MVA]
Línea N1-N2	$2.85 + j 6.084$	15	-----
Línea N2-N3	$1.52 + j 3.225$	8	-----
Línea N3-N4	$1.14 + j 2.434$	6	-----
Carga N2	-----	-----	18
Carga N3	-----	-----	3
Carga N4	-----	-----	6

Para este sistema se asume la ubicación de los relés de sobrecorriente en las subestaciones N1, N2 y N3 para proteger las líneas N1-N2 (relé R3), N2-N3 (relé R2) y N3-N4 (relé R1), respectivamente. De acuerdo a esto, se ejecuta un flujo de carga para obtener las corrientes de operación normal (o carga) y las corrientes de cortocircuito en los barrajes cuando se presenta una falla simétrica o trifásica (ver Tablas 2.5 y 2.6). La relación de transformación de los transformadores de corriente (RTC) es seleccionada garantizando que no se presente saturación de los transformadores de corriente (TC), es decir, que el numerador sea mayor que la corriente nominal en su punto de ubicación.

Es preciso aclarar que en este proyecto: *i)* no se ilustra la coordinación de los relés de corriente definida, ya que no se emplean como una protección dentro de un sistema de potencia y *ii)* la coordinación de los relés está basada en la metodología descrita en [5].

Tabla 2.5. Corrientes del sistema de prueba

Relé	Corriente nominal [A]	RTC
R1	104.97	150 / 5
R2	157.45	200 / 5
R3	472.37	500 / 5

Tabla 2.6. Corrientes de cortocircuito

Barraje	Corriente de cortocircuito [A]
N1	6240.37
N2	2016.88
N3	1441.19
N4	1183.10

2.2.2. Relés de corriente definida y tiempo definido

Las condiciones para realizar esta coordinación son las siguientes:

- El intervalo de coordinación (Δt) es 200 ms.
- Los parámetros del relé para corriente de ajuste (I_a) es de 0.5 a 30 veces la corriente nominal (5 A) en pasos de 0.5.
- El tiempo de ajuste (t_a) está dado en un ajuste discreto de 0.1 a 3.0 segundos en pasos de 0.05.

Para cada relé se determinan sus parámetros de ajuste (I_a y t_a), empezando por el relé más alejado de la fuente (o que no sean protección de respaldo de ninguna otra protección). De acuerdo a esto, el orden de coordinación es R1 (línea N3-N4), R2 (línea N2-N3) y R3 (línea N1-N2).

Para encontrar la corriente de ajuste de cada relé se emplea la siguiente ecuación:

$$I_{sec} = \frac{I_{ccNi}}{RTC} \quad (2.1)$$

Donde I_{ccNi} es la corriente de cortocircuito del nodo siguiente hacia la carga. Luego dicho valor es dividido entre 5A para tener un valor en múltiplos de la corriente nominal secundaria (xI_{nom}). Finalmente el valor resultante es aproximado en función de los pasos de ajuste del relé.

Por lo tanto para R1 se tiene que:

$$I_{sec} = \frac{I_{ccN4}}{RTC} = \frac{1183.10 A}{(\frac{150}{5})} = 39.43 A \text{ (en el secundario del TC)} \quad (2.2)$$

Luego se divide entre 5A:

$$xI_{nom} = \frac{39.43 A}{5A} = 7.87 \quad (2.3)$$

De acuerdo a los ajustes del relé, se tiene que pueden ser: i) $xI_{nom}=7.5$ o ii) $xI_{nom}=8.0$. En este caso se toma el menor valor para garantizar un cubrimiento total de la línea. Este mismo procedimiento se repite, hasta encontrar los valores de ajuste de cada relé como se ilustra en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Ajustes de los relés de corriente y tiempo definido

Relé	xI_{nom}	t [seg]
R1	7.5	0.1
R2	5.5	0.3
R3	2.5	0.5

Para definir los tiempos de operación se empieza seleccionando el menor para el primer relé ($t_{R1}=0.1$ seg), y luego se suma el valor del tiempo de respaldo ($\Delta t=0.2$ seg) al tiempo del siguiente relé.

2.2.3. Relés de tiempo inverso

Las condiciones para realizar esta coordinación son las siguientes:

- El intervalo de coordinación (Δt) es 200 ms.
- Los parámetros del relé para corriente de ajuste (I_a) es de 0.4 a 4.0 veces la corriente nominal (5 A) en pasos de 0.05.
- El Dial está dado en un ajuste discreto de 0.1 a 1.0 en pasos de 0.05.
- La corriente de arranque de los relés no debe ser menor a 1.5 veces la corriente nominal del elemento a proteger. Para esto se usa el factor de sobrecarga ($K=1.5$).
- Se emplea la Norma IEC, con $\alpha=0.14$ y $n=0.02$ (curva inversa estándar).

Para cada relé se determinan sus parámetros de ajuste (I_a y $Dial$), empezando por el relé más alejado de la fuente (o que no sean protección de respaldo de ninguna otra protección). De acuerdo a esto, el orden de coordinación es R1 (línea N3-N4), R2 (línea N2-N3) y R3 (línea N1-N2).

Para encontrar la corriente de ajuste de cada relé se emplea la siguiente ecuación:

$$I_{sec} = \frac{K * I_{nom}}{RTC} \quad (2.4)$$

Luego dicho valor es dividido entre 5A para tener un valor en múltiplos de la corriente nominal secundaria (xI_{nom}). Finalmente el valor resultante es aproximado en función de los pasos de ajuste del relé.

Por lo tanto para R1 se tiene que:

$$I_{sec} = \frac{1.5 * 104.97 A}{\left(\frac{150}{5}\right)} = 5.24 A \text{ (en el secundario del TC)} \quad (2.5)$$

Luego se divide entre 5A:

$$xI_{nom} = \frac{5.24 A}{5A} = 1.049 \quad (2.6)$$

De acuerdo a los ajustes del relé, se tiene que pueden ser: i) $xI_{nom}=1.00$ o ii) $xI_{nom}=1.05$. En este caso se toma el mayor valor para garantizar el cumplimiento del factor de seguridad (K). Este mismo procedimiento se repite, hasta encontrar los valores de ajuste de cada relé como se ilustra en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Corrientes de ajuste de los relés de tiempo inverso

Relé	xI_{nom}	I_a [A]
R1	1.05	157.5
R2	1.20	240
R3	1.45	725

Para encontrar el Dial de cada relé se empieza con el relé más alejado de la fuente. Como R1 no tiene ningún requerimiento de tiempo de operación mínimo, entonces se selecciona el menor Dial ($Dial_{R1}=0.10$). Luego aplicando las ecuaciones (2.7) y (2.8), y teniendo en cuenta la metodología de coordinación descrita en [5], se hallan los Dial de R2 y R3.

$$Dial_{R_i} = \frac{t (M^{0.02} - 1)}{0.14} \quad (2.7)$$

Siendo

$$M = \frac{I_{ccNi}}{I_a} \quad (2.8)$$

Al aplicar la metodología se obtienen los siguientes valores de los Dial, para cada relé:

Tabla 2.9. Dial de los relés de tiempo inverso

Elemento	Dial
R1	0.10
R2	0.15
R3	0.10

2.2.4. Relés de tiempo inverso con unidad instantánea

Las condiciones para realizar esta coordinación son las siguientes:

- El intervalo de coordinación (Δt) es 200 ms.
- Los parámetros del relé para corriente de ajuste (I_a) es de 0.4 a 4.0 veces la corriente nominal (5 A) en pasos de 0.05.
- El Dial está dado en un ajuste discreto de 0.1 a 1.0 en pasos de 0.05.
- Los parámetros del relé para corriente instantánea (I_{inst}) es de 0.5 a 50 veces la corriente nominal (5 A) en pasos de 0.5.
- La corriente de arranque de los relés no debe ser menor a 1.5 veces la corriente nominal del elemento a proteger. Para esto se usa el factor de sobrecarga ($K=1.5$).
- Se emplea la Norma IEC, con $a=0.14$ y $n=0.02$ (curva inversa estándar).

Para cada relé se determinan sus parámetros de ajuste (I_a , $Dial$ y I_{inst}), empezando por el relé más alejado de la fuente (o que no sean protección de respaldo de ninguna otra protección). De acuerdo a esto, el orden de coordinación es R1 (línea N3-N4), R2 (línea N2-N3) y R3 (línea N1-N2).

Los valores de la corriente de ajuste son los mismos que los obtenidos para los relés de tiempo inverso (ver Tabla 2.8).

Para encontrar la corriente instantánea de cada relé, se debe tener en cuenta el tipo de elemento que están protegiendo. Para líneas entre subestaciones se define un valor de K veces la corriente de cortocircuito al final de la línea, siendo $K=1.1$ [5]. Por lo tanto:

$$I_{inst} = \frac{K * I_{ccNi}}{RTC} \quad (2.9)$$

Luego dicho valor es dividido entre 5A para tener un valor en múltiplos de la corriente nominal secundaria (xI_{nom}). Finalmente el valor resultante es aproximado en función de los pasos de ajuste del relé.

Por lo tanto para R1 se tiene que:

$$I_{sec} = \frac{1.1 * 1183.10 \text{ A}}{\left(\frac{150}{5}\right)} = 43.38 \text{ A} \quad (\text{en el secundario del TC}) \quad (2.10)$$

Luego se divide entre 5A:

$$xI_{nom} = \frac{43.38 \text{ A}}{5A} = 8.67 \quad (2.11)$$

De acuerdo a los ajustes del relé, se tiene que pueden ser: i) $xI_{nom}=8.5$ o ii) $xI_{nom}=9.0$. En este caso se toma el mayor valor para garantizar el cumplimiento del factor de seguridad (K). Este mismo procedimiento se repite, hasta encontrar los valores de ajuste de cada relé como se ilustra en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Corrientes instantáneas de los relés

Relé	xInom	Iinst [A]
R1	9.0	1500
R2	8.0	1600
R3	4.5	2250

Para encontrar el Dial de cada relé se empieza con el relé más alejado de la fuente. Como R1 no tiene ningún requerimiento de tiempo de operación mínimo, entonces se selecciona el menor Dial ($Dial_{R1}=0.10$). Luego aplicando las ecuaciones (2.7) y (2.8), y teniendo en cuenta la metodología de coordinación descrita en [5], se hallan los Dial de R2 y R3.

Al aplicar la metodología se obtienen los siguientes valores de los Dial, para cada relé:

Tabla 2.11. Dial de los relés de tiempo inverso con unidad instantánea

Elemento	Dial
R1	0.10
R2	0.15
R3	0.10

2.3. Implementación en Neplan

Es preciso aclarar que para llevar a cabo esta implementación, se asume que el usuario tiene conocimiento previo de las herramientas básicas que ofrece Neplan.

2.3.1. Relés de corriente definida y tiempo definido

Una vez se implementa el sistema de la Figura 2.5, se procede a ubicar los relés R1 (línea N3-N4), R2 (línea N2-N3) y R3 (línea N1-N2) en las subestaciones respectivas (ver Figura 2.6). En esta figura los números en paréntesis identifican cada uno de los elementos involucrados: **(1)** equivalente de red, **(2)** líneas de sub-transmisión, **(3)** cargas y **(4)** relés de sobrecorriente. Antes de empezar a realizar la coordinación de las protecciones de sobrecorriente, debemos de ejecutar el flujo de carga para conocer el valor de las corrientes que circulan por el sistema propuesto.

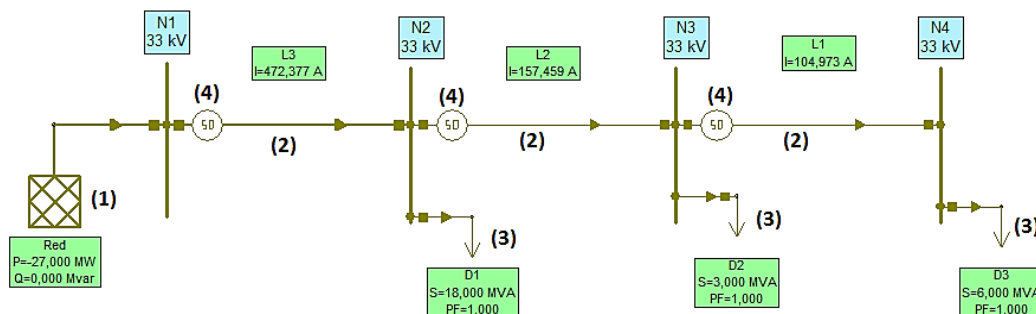


Figura 2.6. Sistema de prueba implementado en Neplan

Los relés se seleccionan de la barra de herramientas ubicada al lado derecho de la pantalla principal en la opción protecciones/switches (ver recuadro rojo en la Figura 2.7). Al dar doble clic en esta opción se despliega el menú ilustrado en la Figura 2.8. Para ubicar estos elementos en el sistema de prueba se arrastran con el mouse hasta el lugar donde se deseen instalar.

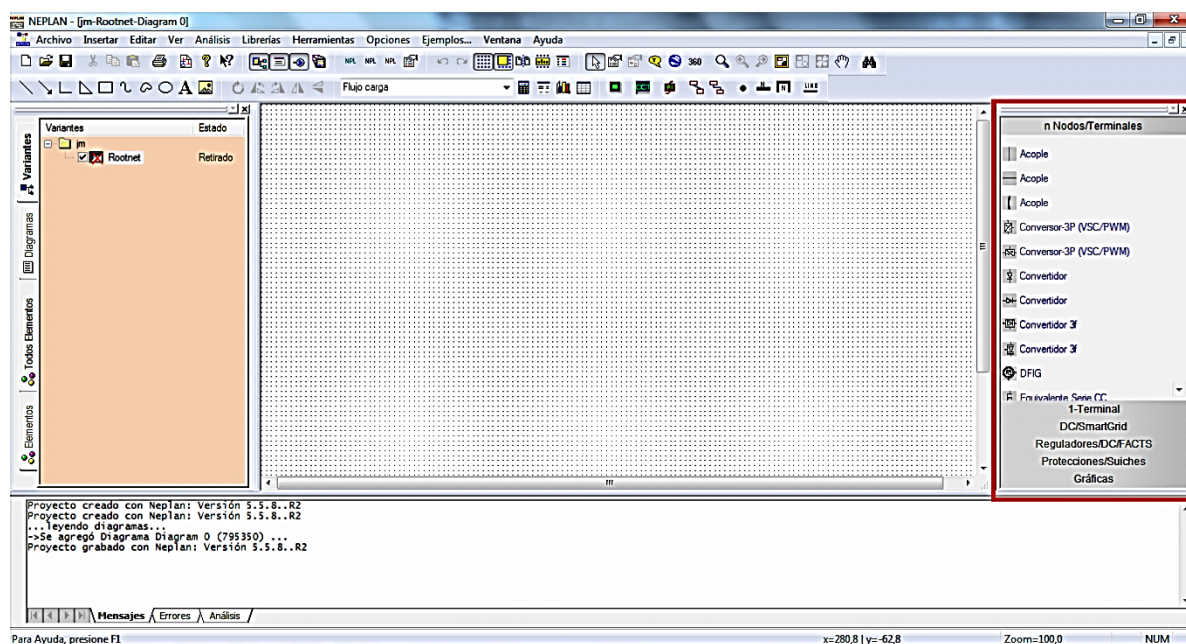


Figura 2.7. Pantalla principal de Neplan

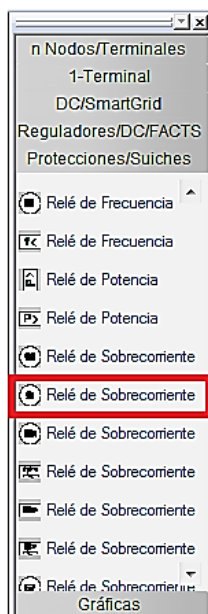


Figura 2.8. Menú de elementos de protección

Una vez situados los relés de sobrecorriente, se deben configurar ingresando sus parámetros de ajuste. Al dar doble clic sobre el relé (en el sistema de potencia), aparece la ventana de la Figura 2.9, en la cual se deben ingresar sus datos de configuración. Para realizar esta acción se tiene la opción “Tipo” resaltada con el número **(5)** en la cual es posible la selección del relé a través de una librería (estos tipos de relés ofrecen diferentes curvas y fabricantes, las cuales son seleccionadas de acuerdo a la necesidad del usuario). Sin embargo para la red propuesta en la Figura 2.5, se procede a realizar la configuración del relé paso por paso.

Figura 2.9. Selección del tipo de relé de sobrecorriente

Al dar clic en la opción “Característica” (identificada con el número **(7)**) se despliega el menú de la Figura 2.10, en donde se hace la selección del modelo de la curva (color y trazo geométrico), para ser diferenciada con la de otros relés al ser graficada en un único diagrama (ver recuadro rojo). Se puede observar que en la parte superior izquierda se ilustran gradualmente los pasos para configurar cada relé (en este caso: paso 1 de 3 – *step 1 of 3*).

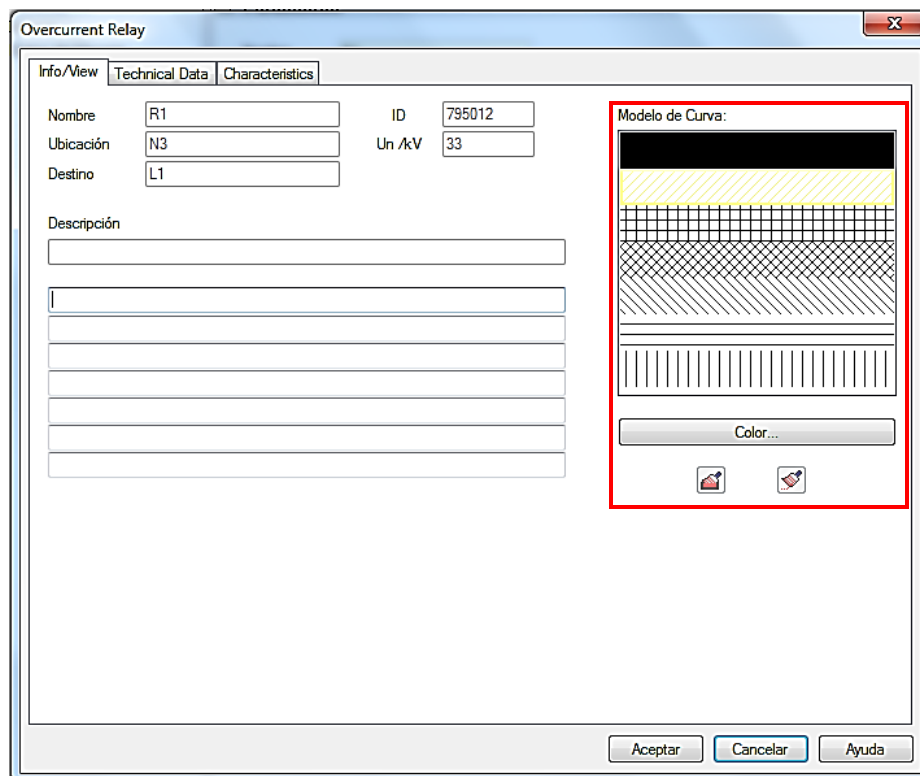


Figura 2.10. Selección del modelo de curva

Una vez se determina el trazado del relé (color y forma), se da clic en el botón “siguiente”, desplegándose el menú de la Figura 2.11.

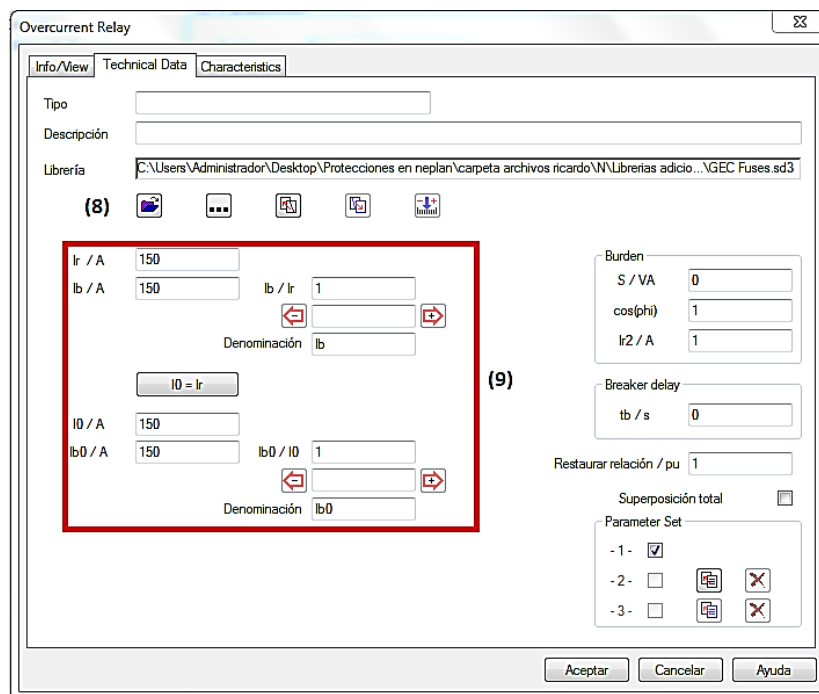


Figura 2.11. Datos técnicos del relé

En este menú existe la opción de selección de relés de otras librerías en **(8)** y la configuración de las corrientes del sistema de protecciones en **(9)** (recuadro rojo). Para realizar la configuración de las corrientes es importante resaltar que I_r/A corresponde al numerador de la RTC del relé asociado.

Otra forma de ingresar los datos de la opción **(9)** es a través de TC, los cuales se encuentran en el menú de la Figura 2.8 en la opción “*protecciones/switches*”. En este caso se debe de colocar un TC para cada relé y se debe configurar la RTC de acuerdo a los valores de corriente (I_r) que circulan por cada elemento, como se observa en la Figura 2.12. El TC debe de ser obtenido de la opción **(6)** de la Figura 2.9 y de forma automática la opción **(9)** de la Figura 2.11, es configurada.

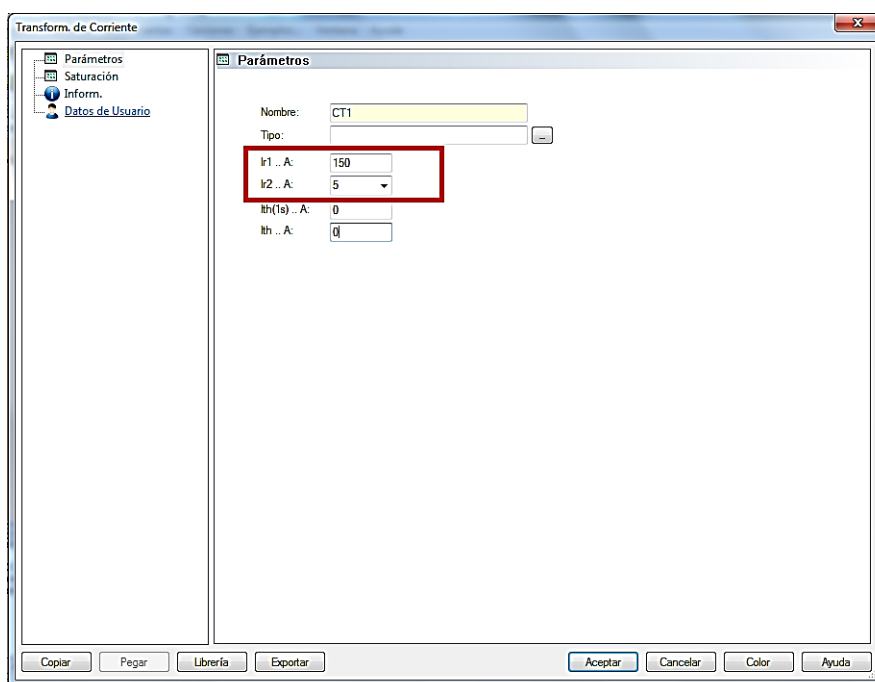


Figura 2.12. Configuración del TC

Una vez se definen estos valores, se da clic en “*siguiente*”, desplegándose el menú de la Figura 2.13 (ver en la parte superior derecha: paso 3 de 3 – *step 3 of 3*). Finalmente se hace el ajuste de la curva, para lo cual se debe tener en cuenta que si se seleccionó un relé de la librería, este traerá unas curvas por defecto **(10)**. En el recuadro identificado con la opción **(11)** se debe configurar el dial del relé y el rango de la corriente de ajuste (arranque o pickup) del relé. Al dar clic en esta opción se despliega el menú de la Figura 2.14.

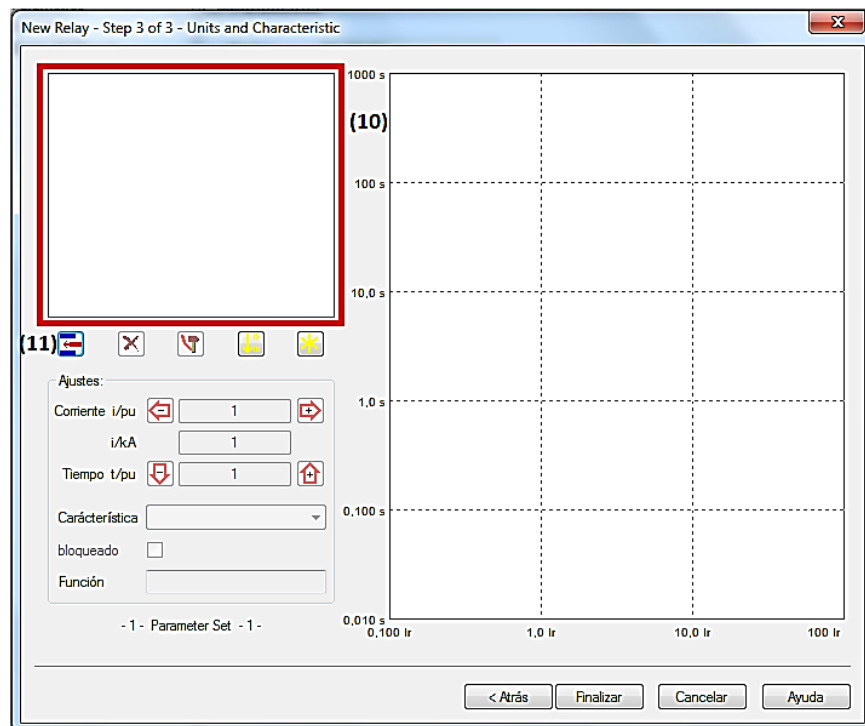


Figura 2.13. Características del relé

Figura 2.14. Ingreso de parámetros de ajuste

En la opción **(12)** (Rango de ajuste) se ingresan los valores de los parámetros del relé para la corriente de ajuste, del siguiente modo: " $xI_{nom_{min}} - \text{paso} - xI_{nom_{max}}$ ". Para este caso se realizó un ajuste desde 0.5 ($xI_{nom_{min}}$) hasta 30 ($xI_{nom_{max}}$) en pasos de 0.5. En la opción **(13)** (Ajustes) se ingresa el valor seleccionado de la corriente de ajuste.

En la opción **(14)** (Rango de ajuste) se ingresa el rango del tiempo de operación del relé del siguiente modo: " $t_{min} - \text{paso} - t_{max}$ ". Para este caso se realizó un ajuste discreto desde 0.1 (t_{min}) hasta 3.0 (t_{max}) en pasos de 0.05 segundos. En la opción **(15)** (Ajustes) se ingresa el tiempo seleccionado para el relé.

La configuración de la tolerancia se hace de acuerdo a la necesidad del usuario y se introduce en la opción **(16)**. En la opción **(17)** se puede seleccionar el tipo de relé, norma y tipo de curva. Para este caso se selecciona la característica de tiempo definido (ver Figura 2.15).

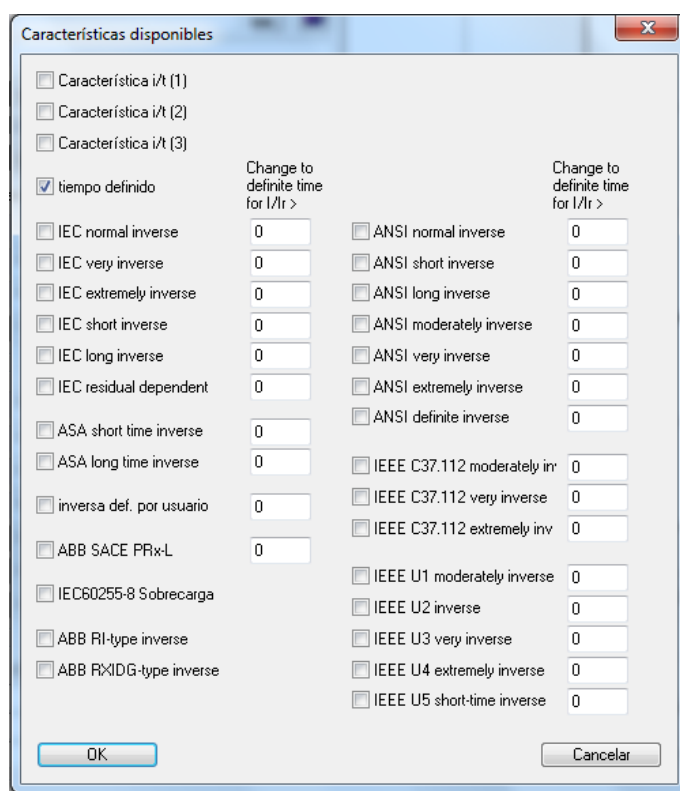


Figura 2.15. Características disponibles de curvas

Para ajustar los relés R2 y R3 se repiten los pasos descritos previamente. Es importante recordar que los parámetros de los tres relés se encuentran en la Tabla 2.7.

Una vez se han involucrado todos los parámetros de los relés, se procede a verificar su funcionamiento a través de la simulación de diversas fallas. En este caso solamente se simuló una falla trifásica al 50% de la línea N3-N4, donde R1 es la protección principal, y R2 y R3 las protecciones de respaldo, respectivamente. El valor de la corriente de cortocircuito en este lugar es 1299.48 A.

Al presentarse una falla en cualquier elemento de la red, los resultados de tiempo de operación y corriente de falla se pueden observar en una gráfica. Para esto se debe dar clic en la pantalla principal de Neplan (ver Figura 2.7) sobre la opción “Análisis > Protección de sobrecorriente > Gráfico del último cálculo”. Al seguir estos pasos se despliegan las gráficas de la Figura 2.16, donde las líneas en amarillo, azul y violeta están asociadas a las características operativas de los relés R1, R2 y R3, respectivamente. La corriente de cortocircuito se ilustra con una doble línea vertical con trazado continuo (en color negro). Se aprecia que el tiempo de operación de R1 ante esta falla es 0.1 segundo.

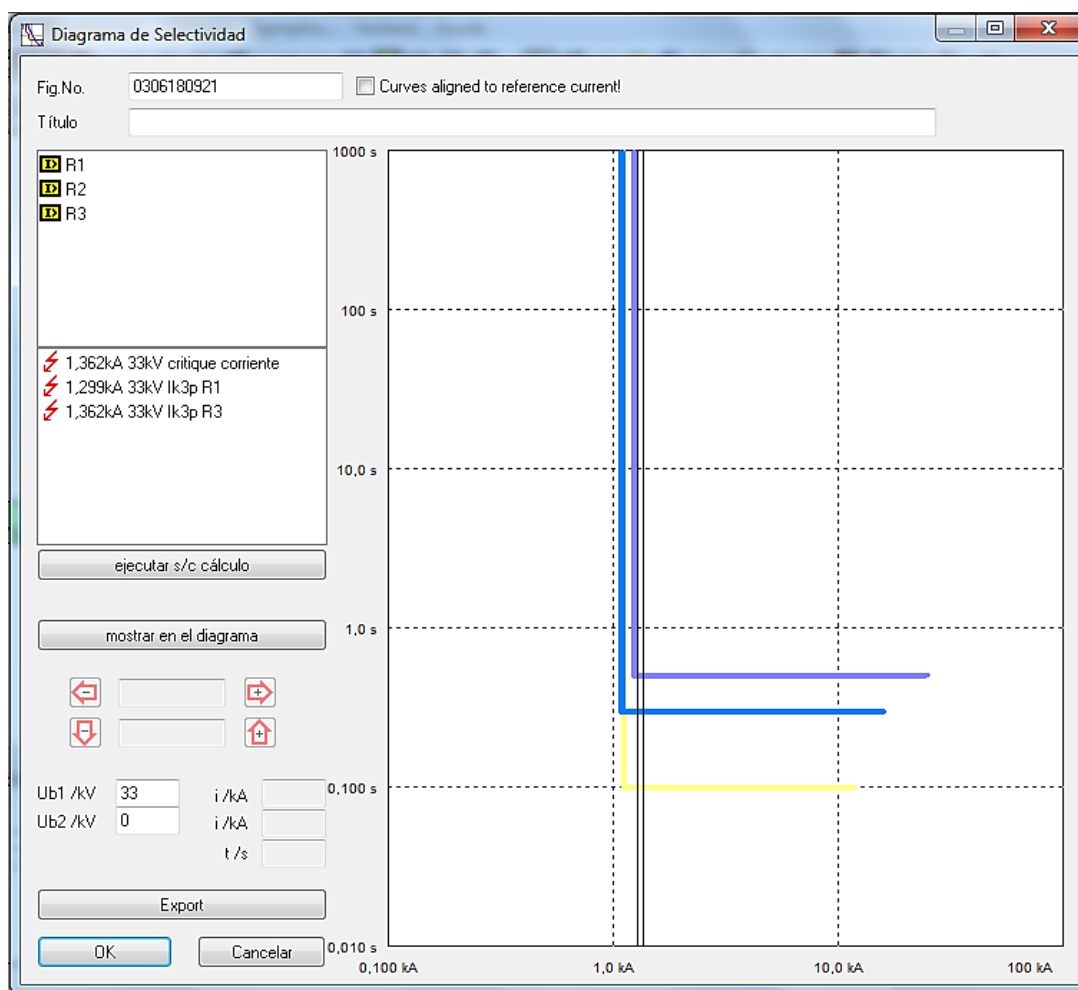


Figura 2.16. Curvas operativas de los relés del sistema

2.3.2. Relés de tiempo inverso

Una vez situados los relés de sobrecorriente, se deben configurar ingresando sus parámetros de ajuste siguiendo los mismos pasos descritos en el numeral anterior. Se debe poner especial cuidado en ingresar adecuadamente los valores de la RTC del TC asociado a cada relé. La diferencia en la configuración entre estos tipos de relés se tiene desde la opción (12) (ver Figura 2.14), en la cual se ingresan los valores de los parámetros del relé para la corriente del siguiente modo: “ $xI_{nom_{min}} - \text{paso} - xI_{nom_{max}}$ ”. Para este caso se realizó un ajuste desde 0.4

(xI_{nom_min}) hasta 4.0 (xI_{nom_max}) en pasos de 0.05. En la opción **(13)** (Ajustes) se ingresa el valor seleccionado de la corriente de ajuste.

En la opción **(14)** se ingresan los valores de los parámetros del relé del Dial del siguiente modo: " $Dial_{min} - paso - Dial_{max}$ ". Para este caso se realizó un ajuste discreto desde 0.1 ($Dial_{min}$) hasta 1.0 ($Dial_{max}$) en pasos de 0.05. En la opción **(15)** (Ajustes) se ingresa el Dial seleccionado para el relé.

La configuración de la tolerancia se hace de acuerdo a la necesidad del usuario y se introduce en la opción **(16)**. En la opción **(17)** se puede seleccionar el tipo de relé, norma y tipo de curva (ver Figura 2.15). Para este caso se selecciona la característica de tiempo normal inverso usando la Norma IEC (*IEC normal inverse*), cuyas constantes de forma son $a=0.14$ y $n=0.0$ (ver Tabla 2.2).

Para ajustar los relés R2 y R3 se repiten los pasos descritos previamente. Una vez se han involucrado todos los parámetros de los relés, se procede a verificar su funcionamiento a través de la simulación de diversas fallas. Al igual que en el relé anterior, se simuló una falla trifásica al 50% de la línea N3-N4 ($I_{cc}=1299.48$ A). Los tiempos de operación de cada relé ante esta falla, se ilustran en la Figura 2.17.

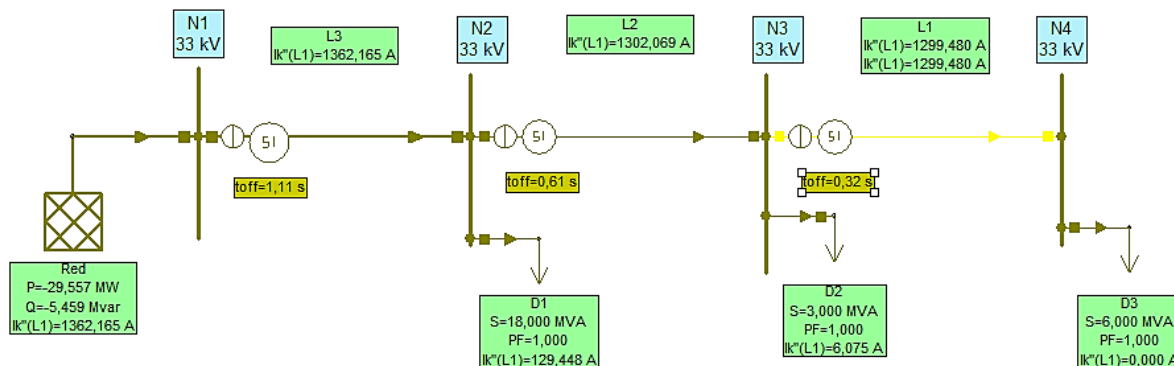


Figura 2.17. Tiempos de operación ante la falla en la Línea N3-N4

El comportamiento de los relés se aprecia en la Figura 2.18, donde las curvas en azul, naranja y rojo están asociadas a las características operativas de los relés R1, R2 y R3, respectivamente. La corriente de cortocircuito se ilustra con una doble línea vertical con trazado continuo (en color negro).

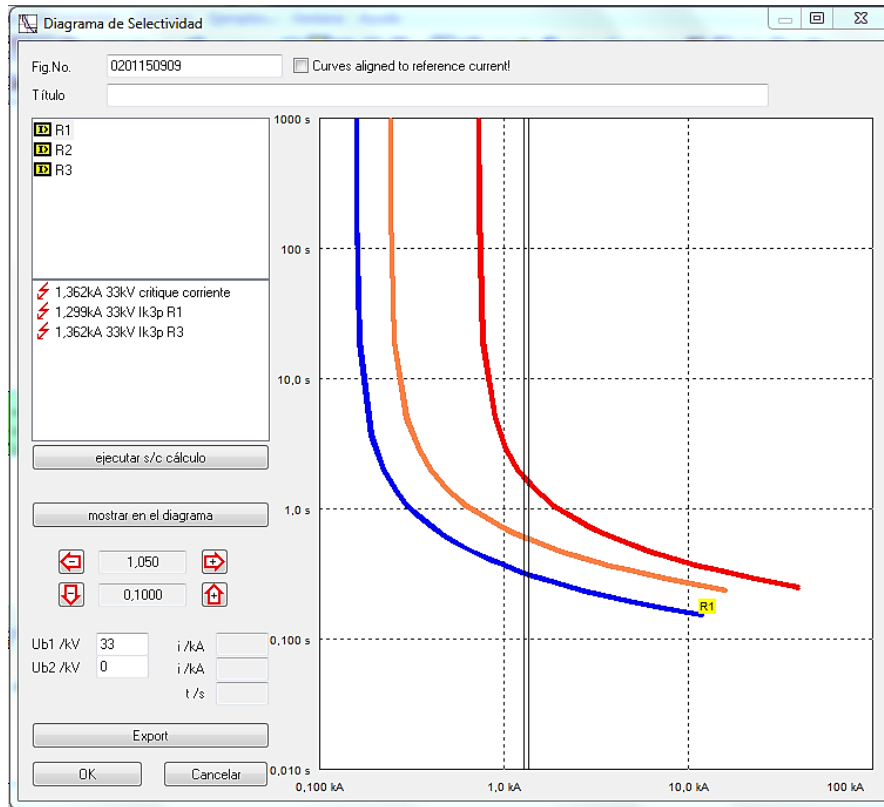


Figura 2.18. Curvas operativas de los relés del sistema

Para verificar teóricamente el comportamiento de los relés, se emplea la Ecuación (2.11), donde $I_{cc}=1299.48$, e I_a y $Dial$ son los valores de ajuste de cada relé (en amperios).

$$t = \frac{0.14 * Dial_{R_i}}{(I_{cc}N_i / I_a)^{0.02} - 1} \quad (2.11)$$

Por lo tanto para los relés R1, R2 y R3 se tiene que:

$$t_{R1} = \frac{0.14 * 0.10}{(1299.48 A / 157.5 A)^{0.02} - 1} = 0.32 \text{ seg} \quad (2.12)$$

$$t_{R2} = \frac{0.14 * 0.15}{(1299.48 A / 240 A)^{0.02} - 1} = 0.61 \text{ seg} \quad (2.13)$$

$$t_{R3} = \frac{0.14 * 0.15}{(1299.48 A / 725 A)^{0.02} - 1} = 1.78 \text{ seg} \quad (2.14)$$

En la Tabla 2.12 se muestra una comparación de los resultados obtenidos, donde se observa la exactitud de los valores obtenidos con Neplan y en forma teórica.

Tabla 2.12. Tiempo de operación de los relés de tiempo inverso

Relé	Tiempos de operación [seg]	
	Neplan	Teórico
R1	0.3	0.3
R2	0.6	0.6
R3	1.1	1.1

2.3.3. Relés de tiempo inverso con unidad instantánea

Una vez situados los relés de sobrecorriente, se deben configurar ingresando sus parámetros de ajuste siguiendo los mismos pasos descritos en los numerales anteriores.

Para la configuración de este tipo de relés se emplea el relé SPAC 635 C (IDMT) obtenido de la librería del Neplan (ver la opción **(8)** en la Figura 2.11), el cual trae unas curvas por defecto (ver opción **(10)** en la Figura 2.19). En el recuadro identificado con la opción **(11)** se debe configurar: i) dial, ii) la corriente de ajuste y iii) la corriente instantánea del relé.

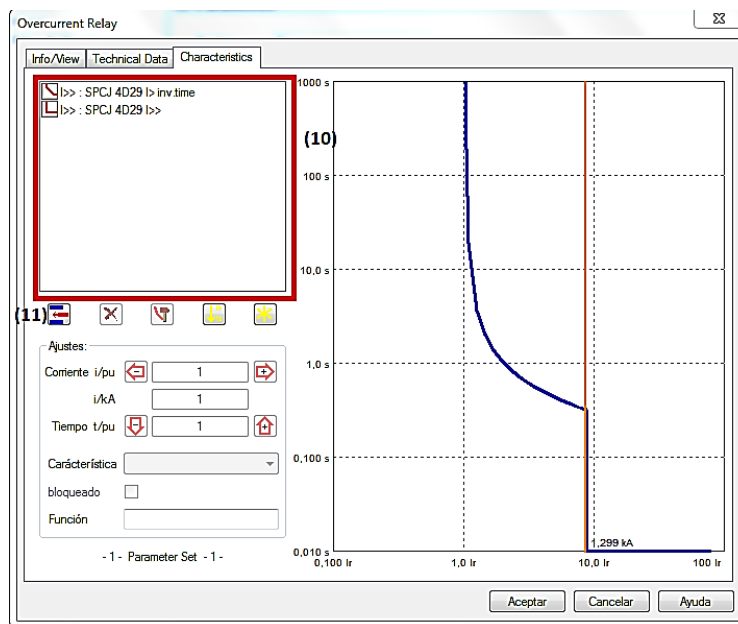


Figura 2.19. Características del relé

Para el caso de los relés de tiempo inverso con unidad instantánea se configura cada protección de forma independiente, es decir, se debe configurar la zona instantánea del relé, de forma independiente a la zona de la curva o Dial (ver Figuras 2.20 y 2.21). En la opción **(12)** se ingresan los valores de los parámetros del relé para la corriente instantánea del siguiente modo: " $xI_{nom_{min}} - \text{paso} - xI_{nom_{max}}$ ". Para este caso se realizó un ajuste desde 0.5 ($xI_{nom_{min}}$) hasta 50 ($xI_{nom_{max}}$) en pasos de 0.5. En la opción **(13)** (Ajustes) se ingresa el valor seleccionado de la corriente instantánea. En este relé el tiempo de operación es instantáneo ($t=0$).

Figura 2.20. Ingreso de parámetros de ajuste instantáneos

En la opción **(14)** se ingresan los valores de los parámetros del relé para la corriente de ajuste del siguiente modo: " $xI_{nom_{min}} - \text{paso} - xI_{nom_{max}}$ ". Para este caso se realizó un ajuste desde 0.4 ($xI_{nom_{min}}$) hasta 4.0 ($xI_{nom_{max}}$) en pasos de 0.05. En la opción **(15)** (Ajustes) se ingresa el valor seleccionado de la corriente de ajuste.

En la opción **(16)** se ingresan los valores de los parámetros del relé del Dial del siguiente modo: $Dial_{min} - \text{Paso} - Dial_{max}$ para este caso se realizó un ajuste discreto desde 0,1 hasta 1,0 en pasos de 0,05. En la opción **(17)** se ingresa el Dial determinado. La configuración de la tolerancia se hace de acuerdo a la necesidad del usuario y se introduce en la opción **(18)**.

El comportamiento de los relés se aprecia en la Figura 2.23, donde las curvas en amarillo, azul y naranja están asociadas a las características operativas de los relés R1, R2 y R3, respectivamente. La corriente de cortocircuito se ilustra con una doble línea vertical con trazado continuo (en color negro).

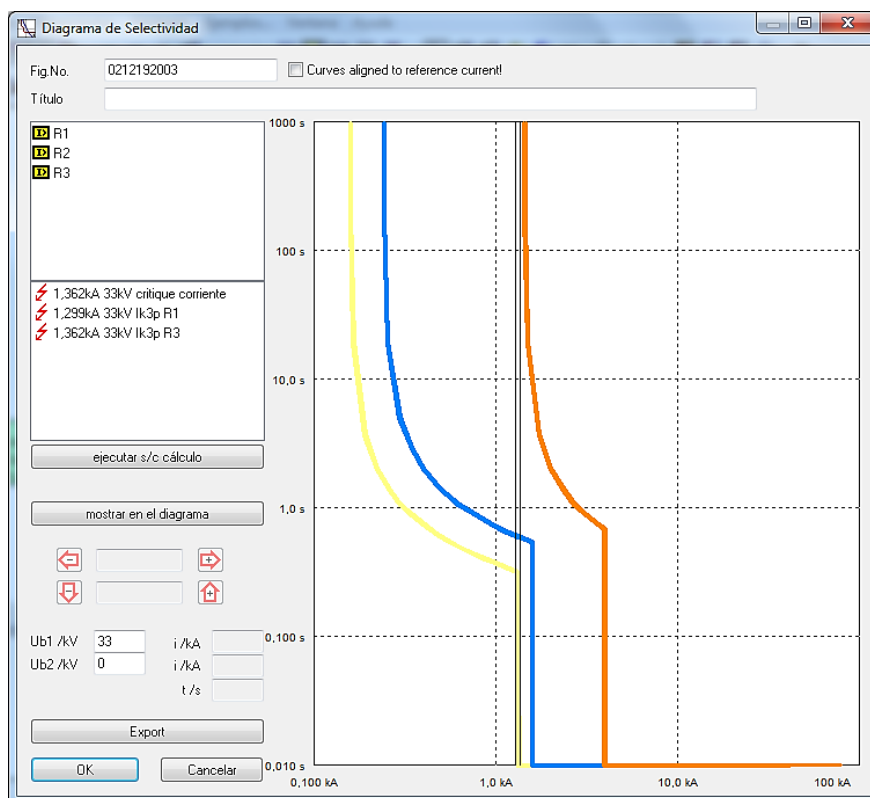


Figura 2.23. Curvas operativas de los relés del sistema

Capítulo 3

Relés de Distancia

En este capítulo se presentan los aspectos más relevantes de los relés de distancia, así como la descripción detallada de la forma de ajustarlos y coordinarlos en Neplan.

3.1. Sistema de prueba

Para ilustrar la coordinación de los relés de distancia se considera el sistema de la Figura 3.1. Este sistema consta de tres líneas de transmisión a 220 kV y demandas en los barrajes N2, N3 y N4. Los datos del sistema se ilustran en la Tabla 3.1.

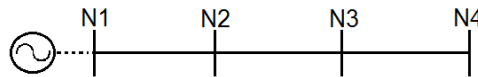


Figura 3.1. Sistema de prueba

Tabla 3.1. Datos del sistema de prueba

Elemento	Impedancia [ohm]	Longitud [km]	Potencia [MVA]
Línea N1-N2	$5.70 + j 66.15$	90	-----
Línea N2-N3	$6.34 + j 73.51$	100	-----
Línea N3-N4	$5.07 + j 58.80$	80	-----
7 Carga N2	-----	-----	18
Carga N3	-----	-----	3
Carga N4	-----	-----	6

Para este sistema se asume la ubicación de los relés de distancia en las subestaciones N1, N2 y N3 para proteger las líneas N1-N2 (relé R3), N2-N3 (relé R2) y N3-N4 (relé R1), respectivamente.

Como criterio de ajuste para las tres zonas de protección se ilustran en las Ecuaciones (3.1) a (3.3):

$$Zona\ 1 = 0.8 * Z_{Línea\ protegida} \quad (3.1)$$

$$Zona\ 2 = 1.2 * Z_{Línea\ protegida} \quad (3.2)$$

$$Zona\ 3 = 2.2 * Z_{Línea\ protegida} \quad (3.3)$$

De acuerdo a lo anterior, se tiene que los ajustes de los tres relés son:

Tabla 3.2. Zonas de ajuste de los relés en Ohmios

Relé	Zona 1	Zona 2	Zona 3
R1	47.22	70.83	129.85
R2	59.02	88.53	162.32
R3	53.12	79.68	146.09

3.2. Implementación en Neplan

Una vez se implementa el sistema de la Figura 3.1, se procede a ubicar los relés R1 (línea N3-N4), R2 (línea N2-N3) y R3 (línea N1-N2) en las subestaciones respectivas (ver Figura 3.2). En esta figura los números en paréntesis identifican cada uno de los elementos involucrados: **(1)** equivalente de red, **(2)** líneas de transmisión, **(3)** cargas, **(4)** relés de distancia y **(5)** transformadores de instrumentación. Antes de empezar a realizar la coordinación de las protecciones de sobrecorriente, se debe ejecutar el flujo de carga para conocer el valor de las corrientes que circulan por el sistema propuesto.

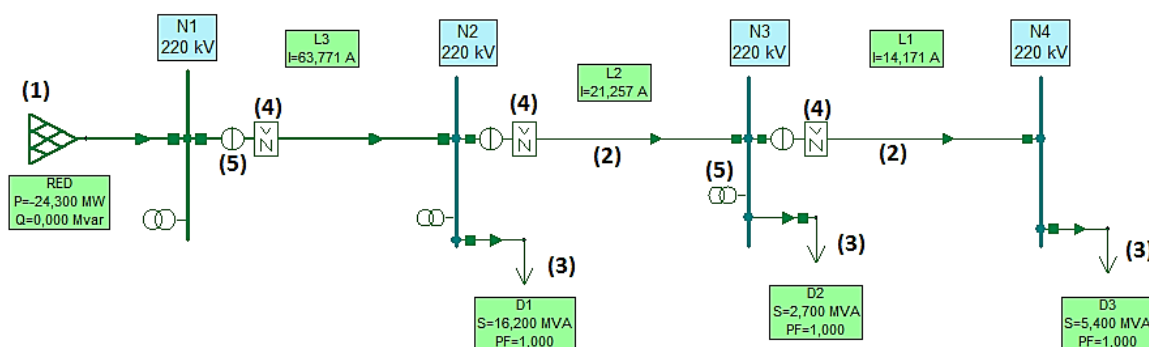


Figura 3.2. Sistema de prueba implementado en Neplan

Los relés de distancia y los transformadores de instrumentación se buscan en la barra de herramientas ubicada al lado derecho de la pantalla principal en la opción “protecciones/switches” (ver Figura 3.3). Al dar doble clic en esta opción se despliega el menú ilustrado en la Figura 3.4. Para ubicar estos elementos en el sistema de prueba basta con arrastrarlos con el mouse hasta el lugar donde se deseen instalar.

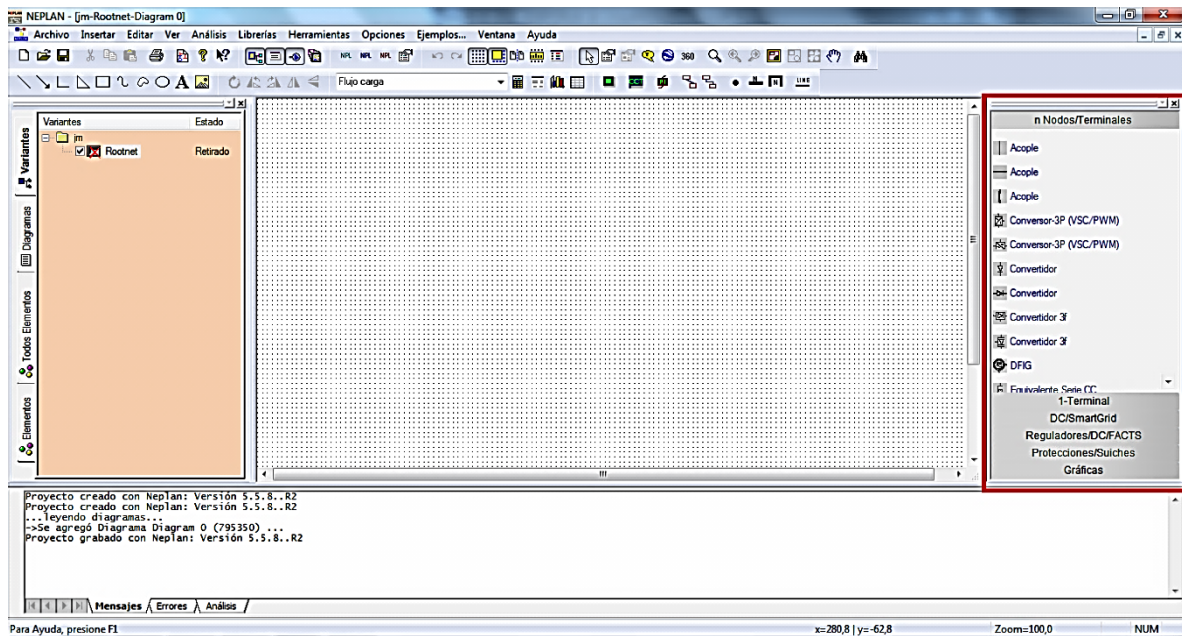


Figura 3.3. Pantalla principal de Neplan

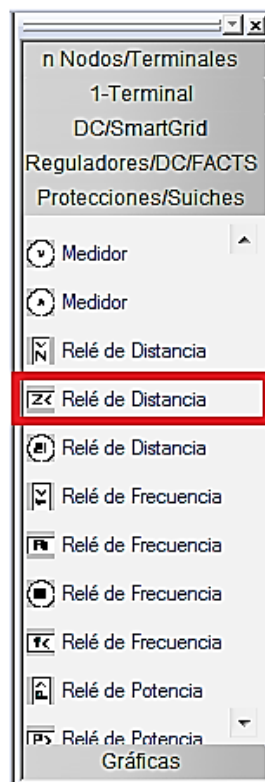


Figura 3.4. Menú de elementos de protección

Una vez situado el transformador de instrumentación se debe configurar la RTC de acuerdo a la corriente que circula por el elemento a proteger (ver Figura 3.5). Los relés de distancia, se deben configurar ingresando sus parámetros de ajuste. Al dar doble clic sobre el relé aparece la ventana de la Figura 3.6, en la cual se deben ingresar sus datos de configuración. Para esto se debe habilitar la opción **(6)** “Usar TC/TP de la red” con el fin de ingresar al relé datos como tensión en los nodos y RTC.

Transform. de Corriente

Parámetros

Nombre: CT1

Tipo:

Ir1 .. A: 20

Ir2 .. A: 5

Ith(1s) .. A: 0

Ith .. A: 0

Copiar Pegar Librería Exportar Aceptar Cancelar Color Ayuda

Figura 3.5. Configuración del TC

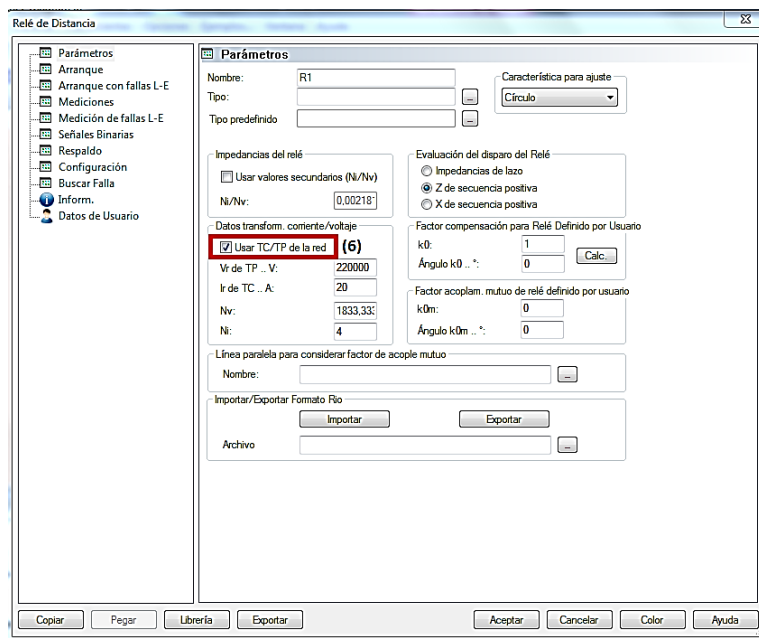


Figura 3.6. Configuración de los relés de distancia

Para configurar la zona de arranque del relé se debe hacer clic sobre la opción “Arranque” situada en el menú mostrado en la parte izquierda de la ventana de configuración del relé de distancia (Figura 3.6), apareciendo la ventana de la Figura 3.7. En este lugar se habilita en “Tipo Arranque” la opción de sobrecorriente (7) y en la “Característica de Arranque” en “Estado” se debe activar la casilla de la opción (8).

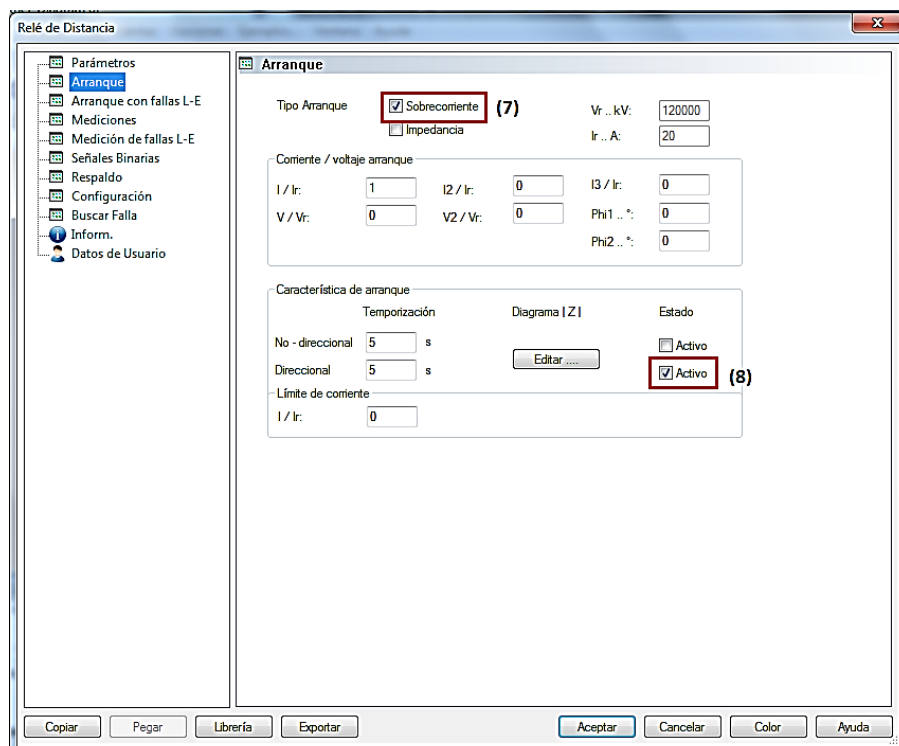


Figura 3.7. Configuración de la zona de arranque del relé de distancia

Posteriormente se debe configurar la representación de cómo se van a medir las fallas y sus tiempo de operación, para lo cual se hace clic en la opción “Mediciones” ubicada en la parte izquierda en la ventana de configuración del relé de distancia, apareciendo la ventana de la Figura 3.8. En este lugar se encuentran las diferentes zonas de protección; para este caso se habilitan: i) la zona 1 (señalada con **(9)**), ii) la zona 2 (señalada con **(10)**) y iii) la zona 3 (señalada con **(11)**).

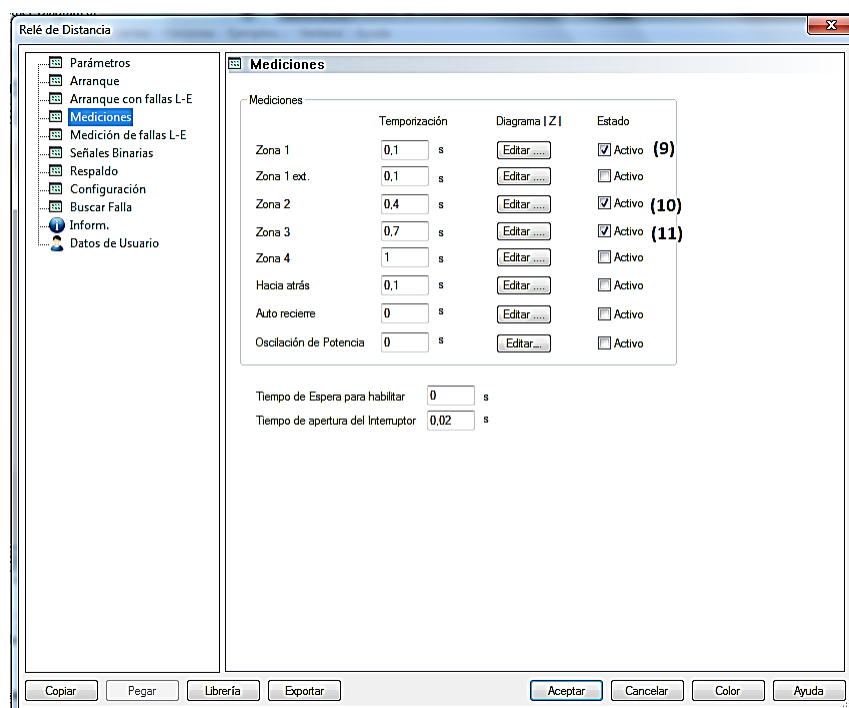


Figura 3.8. Configuración de las zonas de protección

Para realizar la configuración de cada zona se procede a hacer clic en la opción “Editar” en la casilla respectiva. Para editar la zona 1 (ver Figura 3.9), se selecciona el tipo de característica operativa en el plano R-X, seleccionando en “Característica de Corriente” en la opción **(12)** (Tipo) la característica “Circulo”, en **(13)** (Dirección) la operación “Hacia Adelante” y en **(14)** (Radio) el valor de la impedancia de ajuste presentada en la Tabla 3.2.

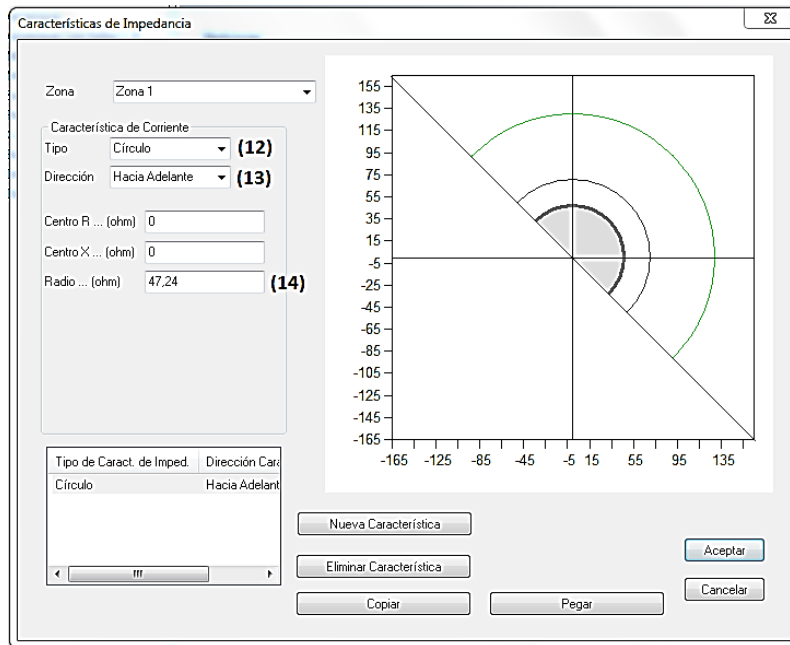


Figura 3.9. Configuración del Plano R-X

Para realizar la configuración de disparo se debe seleccionar la opción “Análisis” > “Protección de distancia” > “Programación de disparo” ubicada en la barra del menú principal (Ver Figura 3.10). Luego se selecciona la opción “Configuración de disparo” > “Adicionar” (ver Figura 3.11), esto con el fin de fijar los relés que se deben coordinar (15) y sus respectivos nodos (16). Finalmente se hace clic en la opción “Recalcular y cerrar”.

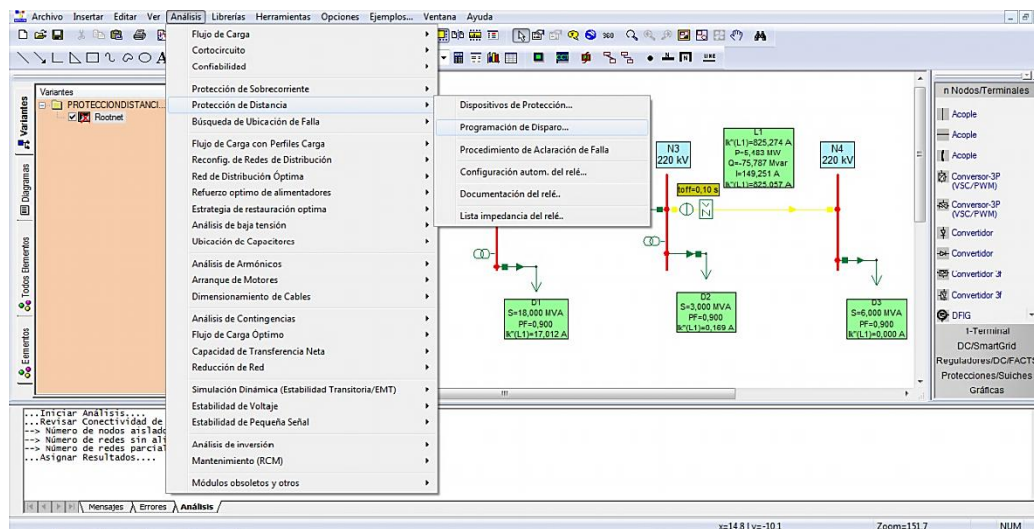


Figura 3.10. Configuración de disparo del relé de distancia

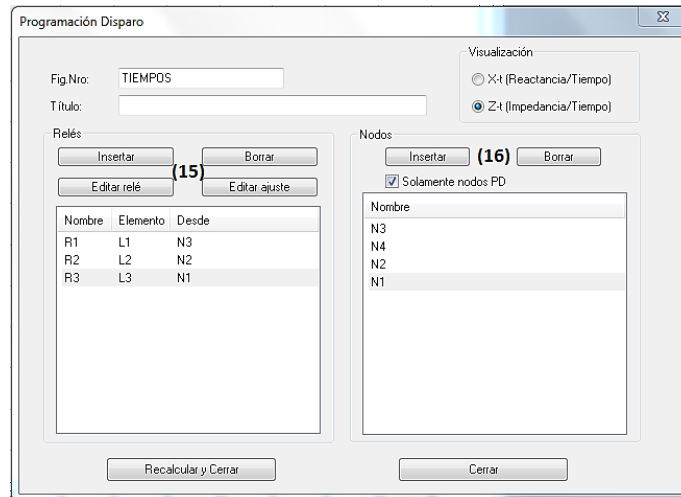


Figura 3.11. Seleccionar relés y nodos asociados

Al terminar la configuración del relé R1, se repite el mismo proceso con los relés R2 y R3. Una vez configurados todos los relés es posible observar el comportamiento de cada relé ante una situación de falla a través del diagrama de tiempo, el cual muestra una gráfica de impedancia (Ohm) contra tiempo (s) (Z vs t). En la Figura 3.12 se observa el comportamiento de los relés ante una falla al 10% de la línea N3-N4, cuya corriente de falla es 825.05 A.

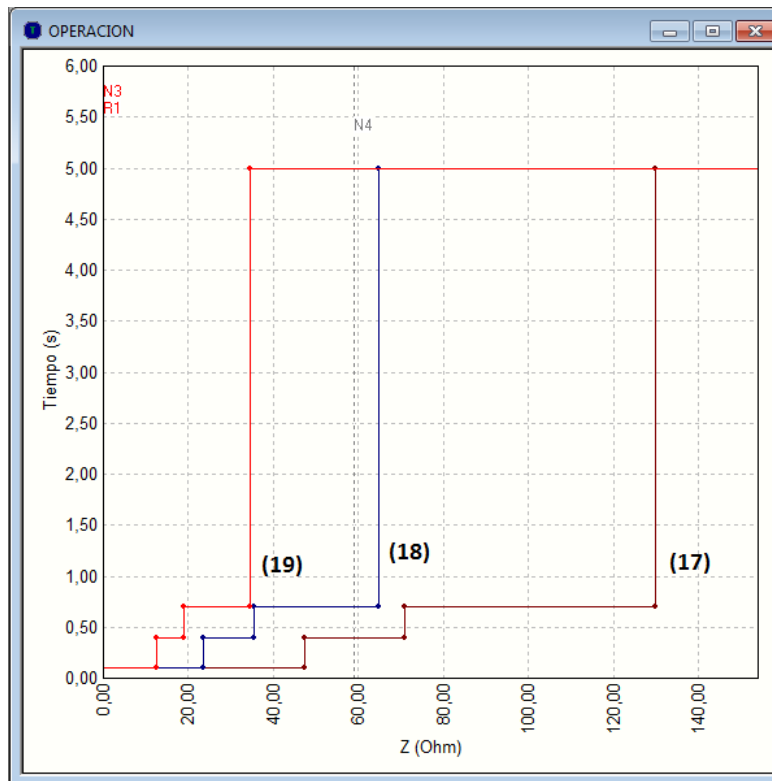


Figura 3.12. Diagrama de tiempo de los relés ante una falla

Del diagrama de tiempo de la Figura 3.12 se aprecia que la característica del relé R1 corresponde a **(17)** con un tiempo de operación de 0.1 segundos, R2 corresponde a **(18)** con un tiempo de operación de 0.4 segundos y R3 corresponde a **(19)** con un tiempo de operación de 5 segundos. Para observar el diagrama R-X de cada relé se selecciona la opción “Análisis” > “Protección de distancia” > “Dispositivos de protección...” (ver Figura 3.10).

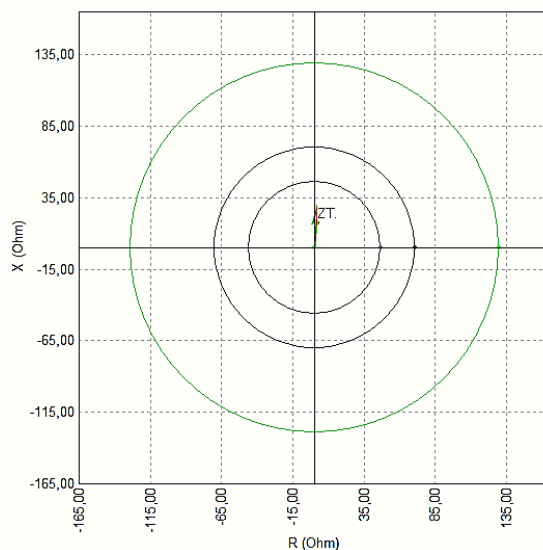


Figura 3.13. Diagrama R-X para R1

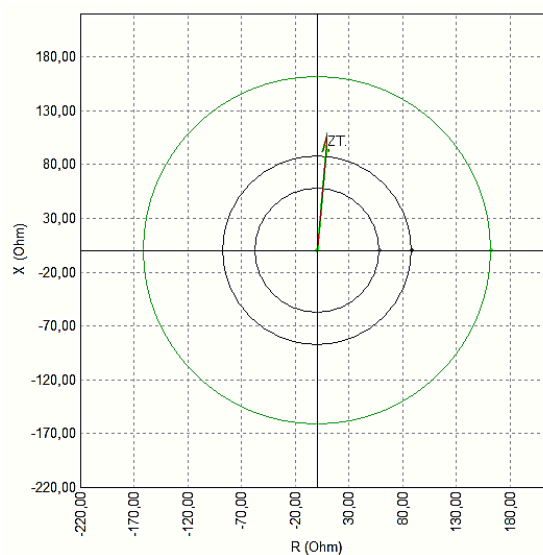


Figura 3.14. Diagrama R-X para R2

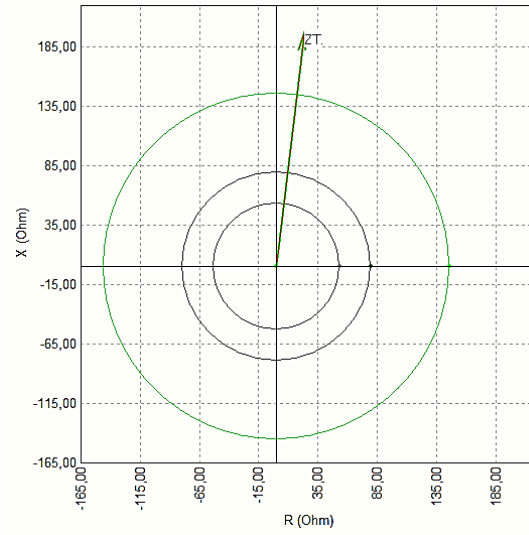


Figura 3.15. Diagrama R-X para R3

Capítulo 4

Fusibles

En este capítulo se presentan los aspectos más relevantes de la implementación de fusibles de protección en sistemas de distribución, usando el software Neplan.

4.1. Sistema de prueba

Para ilustrar la coordinación de los relés de distancia se considera el sistema de la Figura 4.1. Este sistema consta de tres líneas de distribución a 12 kV y demandas en los barrajes N2, N3 y N4. Los datos del sistema se ilustran en la Tabla 4.1.

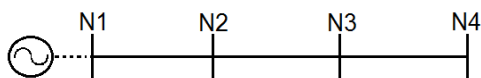


Figura 4.1. Sistema de prueba

Tabla 4.1. Datos del sistema de prueba

Elemento	Impedancia [ohm]	Longitud [km]	Potencia [kVA]
Línea N1-N2	$1.084 + j 0.552$	2.2	-----
Línea N2-N3	$0.739 + j 0.376$	1.5	-----
Línea N3-N4	$0.184 + j 0.095$	2.0	-----
Carga N2	-----	-----	$360 + j 240$
Carga N3	-----	-----	$300 + j 180$
Carga N4	-----	-----	$270 + j 120$

4.2. Implementación en Neplan

Una vez se implementa el sistema de la Figura 4.1, se procede a ubicar los fusibles en los nodos respectivos (ver Figura 4.2). En esta figura los números en paréntesis identifican cada uno de los elementos involucrados: **(1)** equivalente de red, **(2)** líneas de distribución, **(3)** cargas y **(4)** fusibles. Antes de empezar a realizar la coordinación de los fusibles, se debe ejecutar el flujo de carga para conocer el valor de las corrientes que circulan por el sistema propuesto.

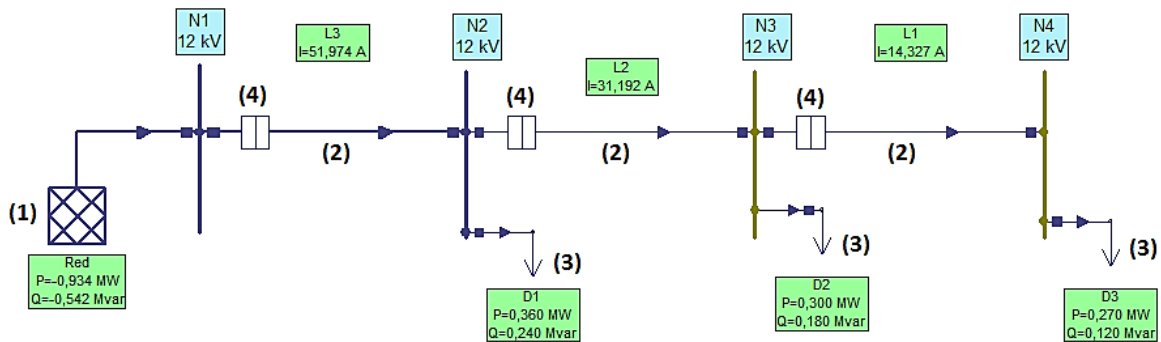


Figura 4.2. Sistema de prueba implementado en Neplan

Los fusibles se buscan en la barra de herramientas ubicada al lado derecho de la pantalla principal en la opción “protecciones/switches” (ver Figura 4.3). Al dar doble clic en esta opción se despliega el menú ilustrado en la Figura 4.4. Para ubicar estos elementos en el sistema de prueba basta con arrastrarlos con el mouse hasta el lugar donde se deseen instalar.

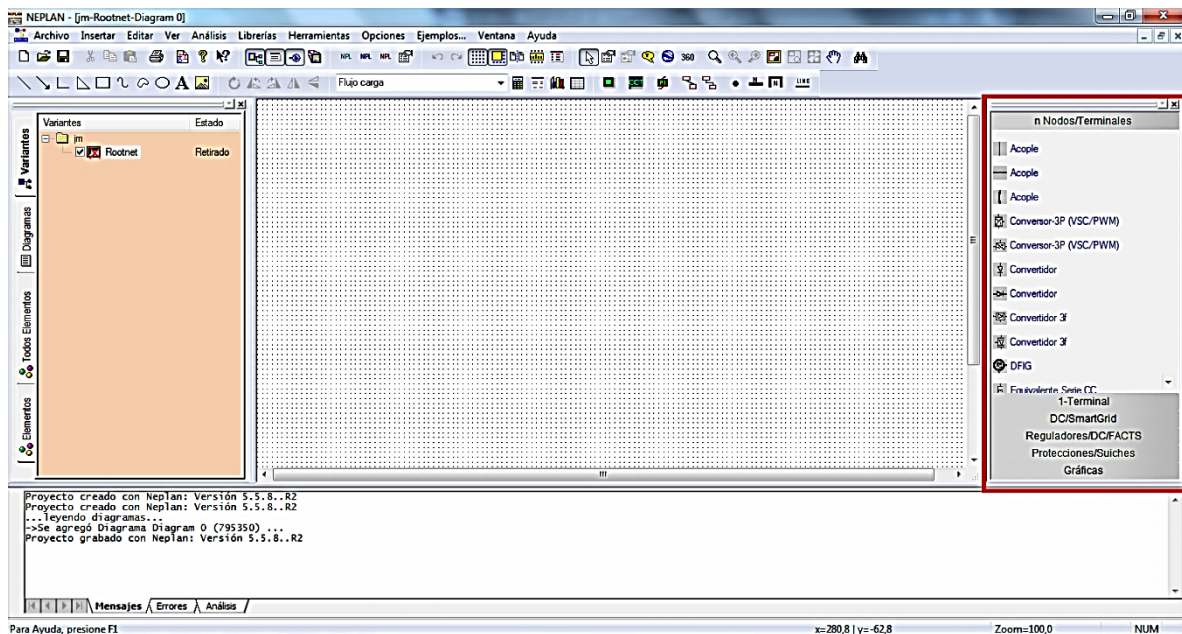


Figura 4.3. Pantalla principal de Neplan

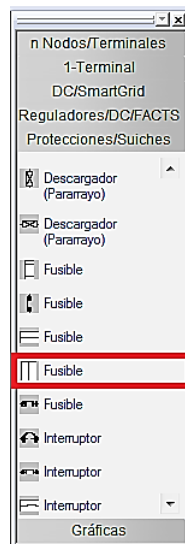


Figura 4.4. Menú de elementos de protección

Una vez situado el fusible, al hacer clic en este elemento se presenta la ventana de la Figura 4.5 en la cual se lleva a cabo su configuración. Para elegir el fusible se puede hacer clic en **(1)** y elegirlo de la librería que Neplan ofrece, o de otro modo se debe hacer clic en “Característica...” y realizar la configuración del color y el modelo de la curva del fusible (ver Figura 4.6). Al hacer clic en “Siguiente” se abre la ventana de la Figura 4.7, en la cual se puede seleccionar un fusible de otras librerías **(2)**, de acuerdo a la necesidad del usuario. Después de seleccionar el fusible se observa que la opción “ I_r/A ” se programa de manera automática. Luego se debe hacer clic en “Siguiente”.

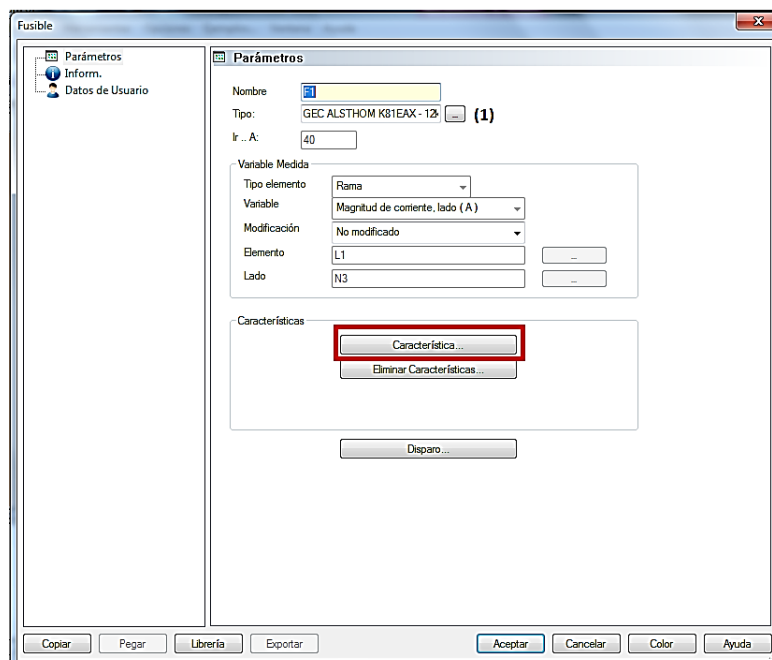


Figura 4.5. Selección del fusible

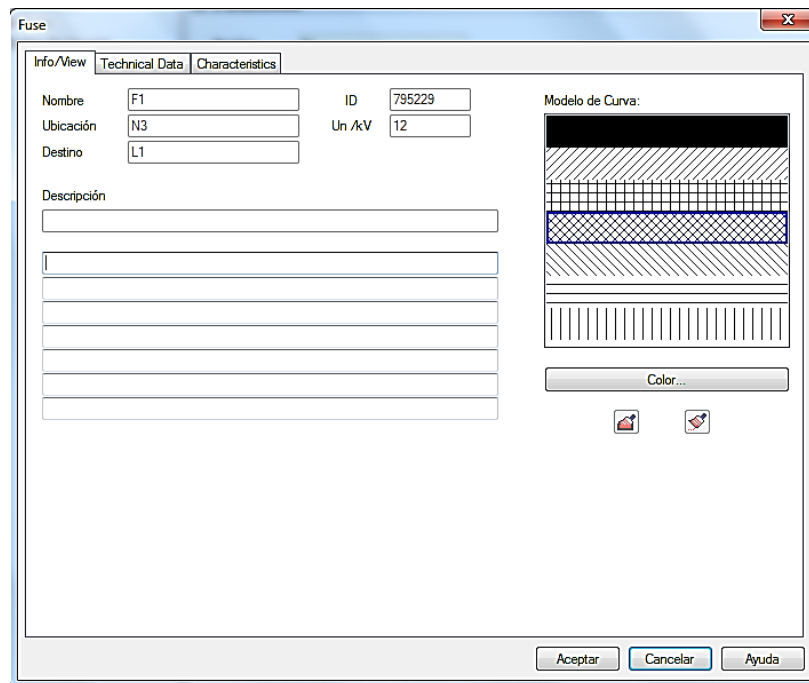


Figura 4.6. Modelo de la curva

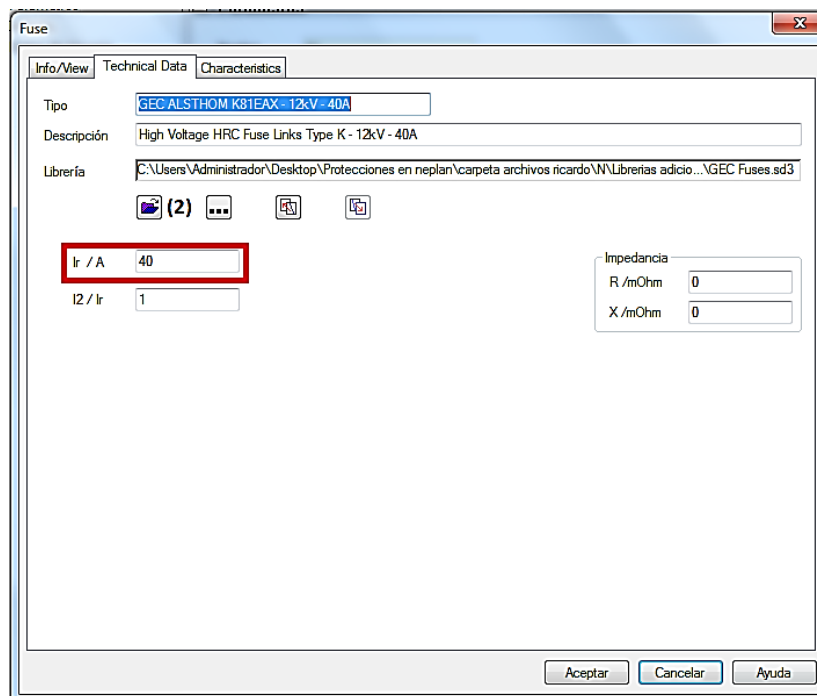


Figura 4.7. Selección de fusibles a través de librerías

En este proyecto se seleccionaron fusibles tipo K de la librería *GEC fuses*. Esta coordinación se realizó de forma manual de acuerdo a las corrientes del sistema, usando la metodología descrita en [5] (ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Fusibles empleados

Elemento	Tipo K
Línea L1	40
Línea L2	50
Línea L3	75

En la Figura 4.8 se puede apreciar la curva del fusible seleccionado y para finalizar la configuración se hace clic en “Finalizar”. Con este mismo proceso se deben configurar los demás fusibles.

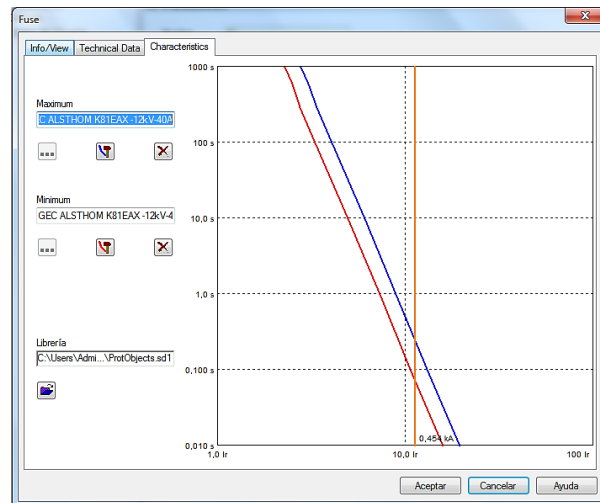


Figura 4.8. Curvas características del fusible

Con el fin de verificar el comportamiento de los fusibles se simula una falla trifásica al 80% de la línea L1, cuya corriente de cortocircuito es 454.27 A. Los resultados de esta coordinación ante la falla mencionada se pueden observar en la Figura 4.9, en donde **(3)** corresponde al fusible en la línea L1, **(4)** corresponde al fusible de la línea L2 y **(5)** corresponde al fusible de la línea L3. La corriente de falla se ilustra con una línea negra continua. Aquí se puede apreciar que primero opera el fusible F1, y posteriormente los otros fusibles como esquemas de respaldo.

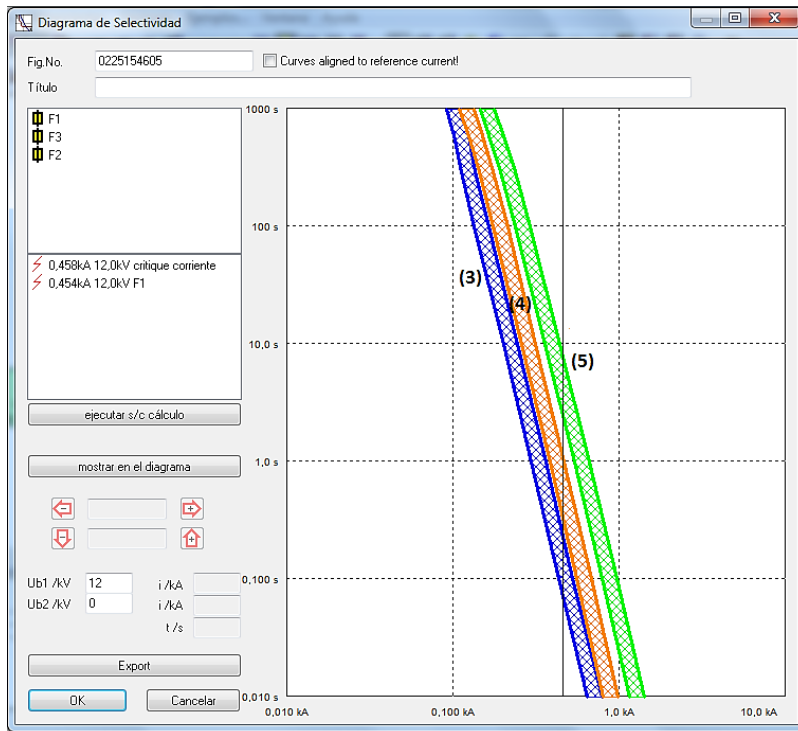


Figura 4.9. Curvas operativas de los fusibles

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- En este trabajo se demuestra que los datos de tiempo de operación obtenidos a través de cálculos y ecuaciones para diferentes tipos de protecciones, es posible verlos reflejados en la simulación, gracias a que Neplan es un software que muestra su comportamiento ante fallas y cualquier tipo de condición que se proponga, en tiempos bastantes pequeños.
- La fácil utilización de Neplan hace de este la mejor opción al momento de construir sistemas eléctricos y realizar pruebas, ya que su interfaz gráfica lo hace amigable al usuario, convirtiéndolo en una herramienta muy útil para reflejar la realidad ante condiciones de falla en un sistema y así tener una aproximación para garantizar el servicio de energía.
- La coordinación de las protecciones de distancia y sobrecorriente puede hacerse a través de librerías al elegir un relé determinado, o de forma manual a través de la construcción de las curvas o configuración de las zonas de protección, esto con el fin de obtener resultados más aproximados a los encontrados mediante ecuaciones y cálculos.
- Para llevar a cabo la coordinación de fusibles en Neplan, es necesario realizar la previa coordinación de forma manual, para entonces elegir de la librería los respectivos fusibles acordes con la configuración del sistema planteado.
- Este proyecto puede ser de utilidad para personas que estén incursionando en el ámbito de las protecciones eléctricas con el fin de ampliar sus conocimientos, o con fines académicos y profesionales para personas que estén investigando en estas temáticas y requieran implementar o solucionar algún caso de la vida real.

5.2. Recomendaciones

- Como trabajos futuros se recomienda emplear sistemas reales, con el fin de verificar el comportamiento de las protecciones en Neplan con las usadas por los Operadores de Red en sus sistemas.

Bibliografía

- [1] Castaño, S. "Protección de sistemas eléctricos". Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- [2] www.neplan.ch
- [3] Gers, J.M. "Aplicación de Protecciones Eléctricas". Universidad del Valle, 1993.
- [4] Gers, J.M., Holmes, E.J. "Protection of Electricity Distribution Networks". IET Power and Energy Series, 2011.
- [5] Zapata, C.J. "Protecciones eléctricas". Texto guía de la asignatura Protección de sistemas eléctricos, Escuela de Tecnología Eléctrica, Universidad tecnológica de Pereira.